

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program B2341 – Strojírenství

Materiály a technologie
zaměření strojírenská metalurgie

Katedra strojírenské technologie
Oddělení strojírenské metalurgie

Posouzení plynatosti vybrané formovací směsi
Selected sand mixture gassiness examination

Miloš Jenčovský

KSP – SM – B11

Vedoucí bakalářské práce: Prof. Ing. Iva Nová, CSc.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Martin Seidl, Ing. Jiří Bradáč

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	45
Počet tabulek:	6
Počet obrázků:	20
Počet příloh:	6

Datum: 26.5.2006

A N O T A C E

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

**Katedra strojírenské technologie
Oddělení strojírenské metalurgie**

Studijní program	B2341 Strojírenství
Bakalář:	Miloš Jenčovský
Téma práce:	Posouzení plynatosti vybrané formovací směsi Selected sand mixture gassiness examination
Číslo BP:	KSP – SM – B11
Vedoucí BP:	Prof. Ing. Iva Nová, CSc. – TU v Liberci
Konzultant BP:	Ing. Martin Seidl, Ing. Jiří Bradáč, - TU v Liberci

Abstrakt:

Tato bakalářská práce pojednává o technologii měření plynatosti formovací směsi. Je rozdělena do dvou základních částí. V první teoretické části je popsána charakteristika vlivu plynatosti formovací a jádrové směsi na vznik vad odlitků, vznik a vývin plynů ze směsi. V druhé praktické části je provedeno měření plynatosti na přístroji sestaveném na KSP TU v Liberci, byla provedena modernizace přístroje a porovnání výsledků měření před a po modernizaci.

Abstrakt:

This bachelor thesis deals with technology of mold sand gassiness measurement. Thesis has two essential parts. First theoretical part describes influence of sand gassiness on casting defects formation and gas generation. There were taken measurements in second practical part of work. Sand gassiness was monitored with equipment designed and assembled at KSP at TU of Liberec.

Equipment was improved during experimental work and thesis brings comparison of results before and after improvement.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 26. května 2006

.....

Miloš Jenčovský
Jeřice 25
508 01 Hořice

Poděkování

Děkuji své vedoucí bakalářské práce paní prof. Ing. Ivě Nové, CSc. a konzultantům Ing. Martinovi Seidlovi a Ing. Jiřímu Bradáčovi za cenné rady a připomínky, které přispěly k jejímu vytvoření.

Obsah

1.	ÚVOD.....	9
2.	TEORETICKÁ ČÁST PRÁCE.....	10
2.1	Slévárenské formovací a jádrové směsi	10
2.1.1	Ostřiva.....	10
2.1.2	Pojiva	12
2.1.3	Pojiva na bázi pryskyřic.....	13
2.2	Plynatost formovacích směsí.....	15
2.2.1	Vznik plynů ve slévárenské formě.....	15
2.2.2	Vniknutí plynů z formy do taveniny.....	18
2.2.3	Vznik plynových bublin v odlitku	20
2.3	Způsoby stanovení plynatosti.....	21
3.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE.....	23
3.1	Použitá metoda měření, měřicí zařízení.....	23
3.2	Charakteristika měřícího zařízení z roku 1995.....	23
3.2.1	Kalibrace zařízení	24
3.3	Návrh nové konstrukce zařízení.....	25
3.3.1	Popis nově zkonstruovaného měřícího zařízení.....	26
3.3.1.1	Tlakové čidlo měřicí soustavy	27
3.3.1.2	Sběrnice dat OMB-DAQ-56 a její ovládací program DaqView	27
3.3.2	Kalibrace zařízení	27
3.4	Měření plynatosti jádrových a formovacích směsí	29
3.4.1	Směs pro měření plynatosti.....	29
3.4.2	Postup měření plynatosti.....	30
3.5	Popis prováděného měření plynatosti	31
3.5.1	Měření plynatosti běžného vzorku.....	31
3.5.1.1	Shrnutí výsledků měření plynatosti běžného vzorku	31
3.5.2	Měření jednotlivých frakcí směsi.....	33
3.5.2.1	Shrnutí výsledků měření plynatosti frakcí směsi	34
3.5.3	Měření za různých teplot ohřevu vzorků	36
3.5.3.1	Shrnutí výsledků měření plynatosti za různých teplot ohřevu.....	36
3.5.4	Měření při změně teploty: $T = 200 - 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$	38
3.5.4.1	Shrnutí výsledků měření při změně teploty	38

4.	DISKUZE VÝSLEDKŮ	40
5.	ZÁVĚR.....	43
6.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	45
	Přílohy	

Seznam použitých zkratk a symbolů

P_f	přetlak plynů ve formě	[Pa]
P_m	metalostatický tlak	[Pa]
P_p	odpor kovu proti vniknutí plynové bubliny	[Pa]
P_{pf}	přetlak plynů nad hladinou roztaveného kovu	[Pa]
V_m	molový objem plynu	[m ³ · kmol ⁻¹]
m	hmotnost	[kg]
M_{CaCO_3}	molární hmotnost CaCO ₃	[kg · kmol ⁻¹]
V	objem uvolněných plynů	[cm ³]
p	tlak	[Pa]
v	měrný objem	[m ³ · kg ⁻¹]
r	měrná plynová konstanta	[J · kg ⁻¹ K ⁻¹]
T	teplota	[K]
V_0	objem měřicí soustavy	[m ³]
ΔV	změna objemu	[m ³]
Δp	změna tlaku	[Pa]
P_a	atmosferický tlak	[Pa]
S_{wi}	povrch všech částic ve frakci	[cm ²]
N_i	počet částic zrn ve frakci	[ks]
$S_{\check{c}i}$	povrch částice	[cm ²]
m_i	hmotnost frakce ostřiva	[g]
d_i	průměr částice	[cm]
S_{gi}	povrch 1g frakce	[cm ² · g ⁻¹]
S_{mi}	měrný povrch frakce	[cm ² · g ⁻¹]
m_c	celková hmotnost všech frakcí	[g]
$m_{\check{c}i}$	hmotnost částice	[g]
N_{gi}	počet zrn 1g frakce	[ks · g ⁻¹]
N_{mi}	měrný počet zrn ve frakci	[ks · g ⁻¹]

1. Úvod

V dnešní době se v nemalé míře uplatňuje snaha zlepšit efektivnost výrobních procesů, která velmi úzce souvisí s kvalitou výrobků. K dosažení tohoto cíle je zapotřebí využívat v co největší míře nejnovější poznatky a trendy vývoje ve slévárenství.

Jedna velká oblast je zaměřena na neustálý vývoj formovacích a jádrových směsí, které by měly mít jak příznivé technologické, tak ekologické vlastnosti. Značný význam mají především nová pojiva formovacích a jádrových směsí, které vedle výše uvedených vlastností také více, či méně přispívají k plynatosti těchto směsí. Tím je ovlivňována kvalita odlitků (bublinatost, odpařeniny).

Proto celou řadu let se pracoviště - Katedra strojírenské technologie TU v Liberci zabývá problematikou sledování plynatosti formovacích a jádrových směsí.

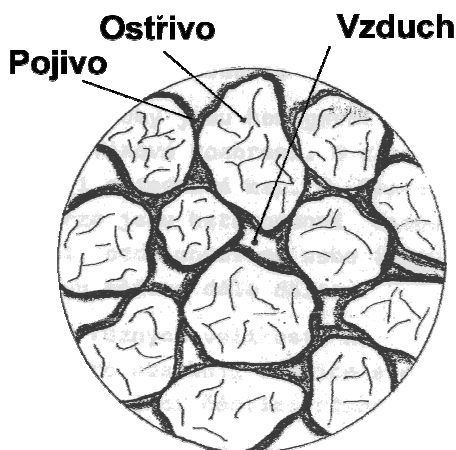
K posouzení vhodnosti formovacích a jádrových směsí a stanovení optimální skladby jednotlivých složek je využíváno mnoho metod. Cílem této bakalářské práce je detailní zmapování jedné z metod a to problematiky plynatosti jádrových a formovacích směsí.

2. Teoretická část práce

2.1 Slévárenské formovací a jádrové směsi

Formovací látky se skládají ze složek, které tvoří ostřivo, pojivo a přísady. Schéma formovací směsi je na obr.2.1. Jako ostřivo se používá zrnitý žáruvzdorný materiál, který tvoří hlavní objem směsi tvořící její nosnou část. Druhou složkou formovací směsi je pojivo. Je to vazná látka, která obaluje zrna ostřiva a v místech kde se zrna ostřiva stýkají je spolu spojuje. Pojivo funguje ve směsi jako plastická látka při formování, a v hotové formě jako pevná látka [6].

Dále jsou ve formovací směsi přísady, to jsou látky, které zlepšují některé vlastnosti směsi při styku z roztaveným kovem, nebo po ztuhnutí odlitku. Jedna z vlastností je např. odolnost proti zapečeninám, kdy se do formovací směsi přidává tzv. nosič lesklého uhlíku (kamenouhelná moučka – letek), který po odlití formy hoří, vytváří plyny, které působí proti nadměrné penetraci taveniny mezi zrna formy. Nebo se do směsi přidávají dřevěné piliny, které po vyhoření zvyšují prodyšnost formy, dále se do směsi mohou přidávat látky zvyšující rozpadavost formy [1].



Obr. 2. 1 Schéma formovací směsi [2]

2.1.1 Ostřiva

Ostřivo je zrnitý žáruvzdorný materiál, který tvoří až cca 98% hmotnosti formovací směsi. Velikost zrn ostřiva je větší než 0,02 mm. je nejdůležitější složkou formovací a jádrové směsi, tvoří její nosnou část, tzv. skelet. Důležité vlastnosti ostřiva jsou:

- a) tvar a povrch zrn;
- b) zrnitost (tzv. granulometrická skladba), tj. rozsah velikost zrn ve směsi;
- c) chemická podstata.

Podle chemické povahy se ostřiva dělí na:

- a) kyselá (křemenné písky);
- b) neutrální (šamot, chromid, korund);
- c) zásaditá (magnezit).

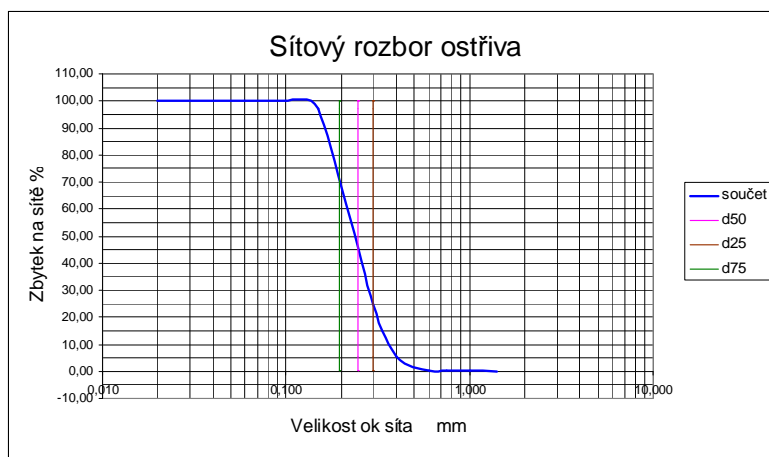
Nejrozšířenější je křemenné ostřivo. Základem je SiO_2 . Je známé pod názvem křemenný písek. Na ostřivo jsou kladeny značné požadavky z hlediska mineralogické a chemické čistoty, tvaru zrn, granulometrické skladby. Z hlediska tvaru zrn je v některých případech ideální tvar koule, což vede k především úspoře pojiva a vytvoření optimální vrstvy na povrchu ostřiva. Naopak z hlediska náchylnosti ostřiva na podporu vzniku záclupů odlitků je výhodnější ostrohrannější ostřivo o různé velikosti. Tvar a velikost ostřiva do jisté míry ovlivňuje velikost pojiva a tím i nepřímo plynatost směsí.

Granulometrická skladba ostřiva je výhodná od 0,1 do max. velikosti 0,5 až 0,6 mm, s průměrnou zrnitostí 0,15 až 0,35 mm podle druhu slitiny a masivnosti odlitků, povrchové čistoty a aktivity povrchu zrna. Čisté ostřivo zbavené vyplavitelných podílů tj. částic < 0,02 mm, což mohou být jíly, živce a prachové podíly, se prosévá řadou sít, která jsou na speciálním zařízení. Síta mají velikost ok 0,06; 0,1; 0,2; 0,3; 0,6; 1,0; 1,5. Tato zkouška se nazývá síťový rozbor a sledují se podíly zachycené na jednotlivých sítích a vyjadřují se v procentech původní navážky. Součtová křivka je uvedena na obr.2.2. Na svislou osu se nanáší procenta ostřiva zachycená na jednotlivých sítích. Na vodorovnou osu, která má logaritmickou stupnici se nanáší velikost ok sít v milimetrech. Průsečík součtové křivky s přímkou označující kritickou velikost částice – ostřiva je bod označující 100% ostřiva. Úsečku, která vyjadřuje 100% ostřiva rozdělíme na 25, 50, 75 % a k těmto hodnotám přiřadíme odpovídající velikost zrna, jež označíme d_{25} , d_{50} , d_{75} .

Na základě síťového rozboru se ostřivo hodnotí:

- podle velikosti středního zrna (d_{50});
- podle pravidelnosti zrnitosti, neboli stupně stejnoměrnosti ($s = d_{75}/d_{25}$).

Čím je hodnota $s = d_{75}/d_{25}$ bližší 1, tím jsou zrna ostřiva stejnoměrnější a součtová křivka je strmější. S klesající hodnotou s je součtová křivka plošší a zrna ostřiva jsou velikostně různorodá.



Obr. 2. 2 Součtová křivka zrnitosti ostřiva

Charakter a tvar zrn ostřiva má velký vliv na technologické vlastnosti formovacích směsí. Ostřiva kulatá jsou lépe spěchovatelná, tím má formovací směs i větší tekutost, avšak větší náchylnost na vznik vad odlitků – zá lupů. U jádrových směsí je tomu naopak. Ve spěchované směsi kulatá zrna ostřiva vytváří více kontaktních míst a směs dosahuje vyšší pevnosti po vysušení než formovací směs s ostrohranným ostřivem.

Nevýhody křemenných ostřiv:

- vykazují vysokou reaktivnost za vysokých teplot s oxidy Fe a jiných kovů, důsledkem jsou povrchové vady odlitků připečeniny;
- neplynulá tepelná dilatace v důsledku modifikačních přeměn;
- způsobuje nemoc tzv. silikozu [1].

2.1.2 Pojiva

Částice ostřiva prakticky nevytvářejí mechanicky stabilní soustavu, neboť přitažlivé síly mezi nimi se začínají projevovat až u částic o rozměru menším než 0,001 mm. Proto musí být ke spojení zrn ostřiva ve formovací směsi použito tzv.

pojiv, látek, které jsou schopny vytvořit na částicích ostřiva souvislou vrstvu, jejímž prostřednictvím se částice dotýkají a vytvářejí se mezi nimi vazby. K tomu, aby pojivo mohlo spojovat částice ostřiva, musí být v kapalném nebo kašovitém stavu.

K tomu mohou být použity látky:

- a) Kapalně při pokojové teplotě přecházející do kapalného stavu rozpuštěním ve vhodných rozpouštědlech (voda, etylalkohol, aceton aj.) za vzniku pravých i nepravých roztoků;
- b) přecházející do kapalného stavu ohřevem a roztavením.

Rozdělení pojiv je možné podle mnoha hledisek, např. podle chemické příbuznosti, podle způsobu vytvrzování ve směsi apod.. Nejčastěji se však rozdělují podle jejich původu a to na:

- a) **anorganická pojiva** – jíly, cement, sádra, vodní sklo aj., jejich pojicí schopnost se uplatňuje již v syrovém stavu nebo po chemickém, resp. fyzikálním zpevnění;
- b) **organická pojiva** – umělé pryskyřice, oleje, sacharidy, bitumeny aj. odpadní organické produkty, jejich pojicí schopnost se uplatňuje po tepelném nebo chemickém ztužení.

Vlastnosti pojiva jsou značně ovlivňovány působením taveniny kovu na materiál formy nebo jádra, což se projevuje jejich významným podílem na fyzikálně-chemických dějích v soustavě. Ve většině případů při tom pojivo ztrácí pojicí schopnost při opětovném použití části formovací a jádrové směsi a musí být nahrazeno novým [2].

2.1.3 Pojiva na bázi pryskyřic

Názvem pryskyřice se označují látky, jejichž podstatou jsou makromolekulární látky, které lze tvářet teplem, tlakem nebo obojím současně. Podle toho jak se chovají při zahřívání se dělí pryskyřice na:

- a) **termoplastické**, jejichž vlastnosti se při zahřívání mění vratně, působením tepla tyto pryskyřice měknou a při ochlazení opět tvrdnou;
- b) **termoreaktivní**, které při zahřívání přecházejí nevratně do netavitelného a

nerozpustného stavu.

Základními pochody, kterými vznikají vysokomolekulární sloučeniny, jsou polymerace a polykondenzace.

Polymerace je reakce, při které vzniká látka s velkou molekulovou hmotností (polymer) sloučením stejných nebo různých molekul nenasycených nebo cyklických sloučenin (monomerů), aniž se při tom vylučují vedlejší produkty.

Polykondenzace je reakce dvou nebo několika sloučenin, které mají v molekule nejméně dvě reaktivní skupiny nebo atomy. Polykondenzací vznikají vysokomolekulární látky a vylučují se vedlejší nízkomolekulární produkty.

Pryskyřice používané ve slévárenství jako pojiva formovacích a jádrových směsí jsou termoreaktivní, přecházejí nevratně do netavitelného a nerozpustného stavu polykondenzací [8].

Pryskyřičná pojiva potřebují krátkou dobu mísení. Obsahují uhlík vázaný v benzenovém jádře, který se po odlévání slučuje s kyslíkem, dochází k hoření a k uvolňování tepla.

Typy pryskyřic:

- a) fenolformaldehydové (jsou zdravotně závadné);
- b) furanové (vyrábí se z odpadů dřeva, kukuřice atd.);
- c) polyuretanové;
- d) alkydové.

Obsah pryskyřice ve směsi je cca 1,5 hmot. % množství ostřiva.

Pryskyřičná pojiva pro výrobu skořepin. Pryskyřice jsou buď furanové nebo novolakové. Novolaková FF pryskyřice slouží k přípravě obalených směsí, kdy na zrna ostřiva je nanesen film pojiva, tj. při teplotě 150° C se ostřivo mísí v kolovém mísiči s pryskyřicí bez katalyzátoru. Tyto směsi jsou základem pro Croningovou metodu výroby skořepinových forem a jader. Sypká obalená směs dobře foukatelná i do tvarově složitého jaderníku se vytvrzuje teplem kovového jaderníku při teplotě 240 až 280°C, přidáním katalyzátoru dojde k vytvrzení směsi za vzniku termosetu bakelitového typu.

Pryskyřičná pojiva pro metodu horkých jaderníků, hot-box (HB).

Pojivem jsou pryskyřice na bázi rezolu, který po rozmíchání ve směsi s křemenným ostřivem a malým množstvím katalyzátoru (katalyzátorem je kyselina) tvoří vaznou směs. Tato směs se vstřeluje do horkého jaderníku, kde teplem probíhá vytvrzení celého objemu jádra. Teplota jaderníku bývá 370°C. Na rozdíl od Croningových skořepin nejsou jádra dutá, avšak za cenu podstatně vyšší spotřeby směsi

Pryskyřičná pojiva pro metodu studených jaderníků, cold-box (CB).

Používají se rezolové pryskyřice. Proces je založen na vytvrzení pryskyřice bez působení tepla. Směs se připravuje smícháním ostřiva a dvousložkového pojiva. Směs se vstřelí nebo foukne do jaderníku. Vytvrzení probíhá tak, že se směs profoukne katalyzátorem (katalyzátorem je silné kyselé prostředí) [1].

2.2 Plynatost formovacích směsí

Plynatost je schopnost formovacích a jádrových materiálů uvolňovat při ohřevu plyny a páry. Jsou to nežádoucí děje popisující dílčí chování těchto disperzních materiálů při vysokých teplotách, krátce po zalití slévárenské formy a tudíž by měla hodnota plynatosti vykazovat co nejnižší hodnoty. Množství uvolňujících se plynů je dáno druhem pojiva a jeho podílu ve směsi, sklonem k navlhavosti směsi, způsobem sušení, zrnitostí ostřiva, prodyšností jader a obsahem různých přísad určených k vyvolání vytvrzovacích reakcí či k cíleným technologickým požadavkům na samotná jádra.

Kromě množství uvolněných plynů je ovšem důležitá i rychlost jejich vývoje a také časový okamžik uvolnění v procesu tuhnutí kovu. Ze složek formovací směsi vykazuje značnou plynatost voda a další kapalná rozpouštědla, některé minerály, pojiva organické přísady a další látky [2].

2.2.1 Vznik plynů ve slévárenské formě

Plyny ve slévárenské formě vznikají od okamžiku, kdy vnikne roztavený kov do dutiny slévárenské formy a také dochází ke sdílení tepla a prohřívání formovacího materiálu. Rychlost prohřívání, resp. zvětšování hloubky prohřátí formy na určitou teplotu, závisí na teplotních podmínkách na rozhraní tavenina-forma a na tepelně fyzikálních vlastnostech formovacího materiálu. Při dosažení určité teploty

(intervalu teplot) prodělávají některé složky formovacích směsí významné fyzikálně chemické přeměny doprovázené uvolňováním plynných produktů [2].

Plyny ve slévárenské formě vznikají v důsledku:

- a) Vypařováním vody a jiných kapalných látek (rozpouštědel).
- b) Spalováním organických látek.
- c) Destilací různých organických látek.
- d) Tepelným rozkladem minerálů, při kterém se uvolňuje krystalická voda.
- e) Rozkladem různých látek, při kterém vznikají plyny.
- f) Rozpínání vzduchu obsaženého ve formovací směsi.

Uvedené procesy mají vliv na vznik plynů. V důsledku nerovnoměrného rozdělení teplot ve slévárenské formě při ohřevu probíhají prakticky současně.

a) Vypařování vody a jiných kapalných látek (rozpouštědel)

Vypařování vody se nejvíce projevuje u směsí obsahujících vodu jako rozpouštědlo pojiv. Kromě vody může směs obsahovat i jiné vypařující se kapaliny. Voda obsažená ve formovacích směsích se nechová jako prostá mechanická přímíšenina. Navlhování směsí, ale i opačný proces, jako vysoušení je provázen složitým komplexem fyzikálně-chemických jevů.

b) Spalování organických látek

Ve směsích probíhá za přítomnosti oxidovadel (vzdušný O_2 obsažený v pórech jádra nebo přicházející kapilárami formy či jádra, dále vodní pára a CO_2). Vzdušný O_2 v pásnu hoření může prostupovat prostřednictvím difúze přes póry směsi a kromě toho vzduch je obsažen na začátku procesu v pórech.

Ve skutečnosti jsou zdroje kyslíku omezené a nemohou zajišťovat intenzivní průběh oxidace organických látek. Průchod vzduchu přes póry formy po jejím naplnění tekutým kovem se prakticky zastavuje, protože vzniká velký vstřícný proud plynů, který směřuje od odlitku do atmosféry. Množství kyslíku v pórech ve srovnání s množstvím vznikajících plynů je malé. Celkově je možno říci, že v pískových formách/ jádrech/ se vytváří a neustále obnovuje atmosféra složená z různých plynů a probíhá neúplné okysličení C na CO, jehož přítomnost ve velkých množstvích v

atmosféře licí formy je experimentálně potvrzena. V případě volného přístupu vzduchu z formovacího materiálu ohřátém na vysokou teplotu organické látky úplně shoří s přednostním vznikem CO_2 .

c) Destilací různých organických látek

Pomalý tepelný rozpad organických látek probíhá bez přístupu nebo s omezeným přístupem vzduchu (či jiného oxidovadla). Nejprve se při ní uvolňují těkavější frakce a postupně frakce méně těkavé. Konečným produktem destilace je koks. Tento děj se významně uplatňuje při ohřevu směsí obsahujících větší množství organických poživ (např. umělých pryskyřic).

d) tepelný rozklad minerálů při kterém se uvolňuje krystalická voda

Probíhá při ohřevu některých minerálů obsažených ve směsi, přičemž se uvolňuje plynná složka, některé minerály mají vysokou plynatost. Součástí minerálů je i voda, která se v minerálech váže ve třech podobách:

- *konstituční voda* - má nejpevnější vazbu s krystalickou mřížkou. Uvolňuje se při určité teplotě, obvykle při vypalování nebo při chemické reakci, tento proces není vratný a minerál zbavený konstituční vody se rozpadá;
- *krystalizační voda* - má mnohem slabší vazbu než předchozí a uvolňuje se při žhánání někdy ve dvou i třech tepelných intervalech. V mnohých případech se při namočení krystalizační voda opět naváže na minerál;
- *volně vázaná voda* - proniká do krystalické mřížky, ale není chemicky vázaná. Její vazba je dána délkou kontaktu s minerálem, teplotou, tlakem a jinými faktory.

e) Rozkladem různých látek, při kterém vznikají plyny

Může nastat u plynů uvolňujících se v důsledku některého z popsaných dějů. Nejčastěji se takto rozkládá při vysokých teplotách uhlovodíky a dochází přitom ke zvětšování objemu plynné fáze a k usazování uhlíku ve formě sazí v pórech směsi.

f) rozpínání vzduchu obsaženého ve formovací směsi

Při ohřevu formy či jádra se objem plynu bude zvětšovat. Ve většině případů se však toto zvětšení objemu při ohřevu teploty 500 - 700 °C bude podílet pouze malou částí na celkovém objemu uvolňujících se plynů a to jen na velmi krátkou

dobu (několik sekund po zaplnění formy taveninou).

Vzduch uzavřený v dutině formy, odchází převážně přes výfuky a v omezeném množství přes póry forem a jader [2].

2.2.2 Vniknutí plynů z formy do taveniny

V praxi požadujeme, aby plyny formy odcházely formou a plyny kovu taveninou. Při nevhodných energetických a tlakových podmínkách na rozhraní forma-kov často dochází k pronikání plynů formy do kovu a naopak viz. obr. 2.3.

Plyny z formy mohou vniknout do roztaveného kovu v případě, kdy:

$$P_f = P_m + P_p + P_{pf}, \quad (2-1)$$

kde značí: P_f - přetlak plynů ve formě,

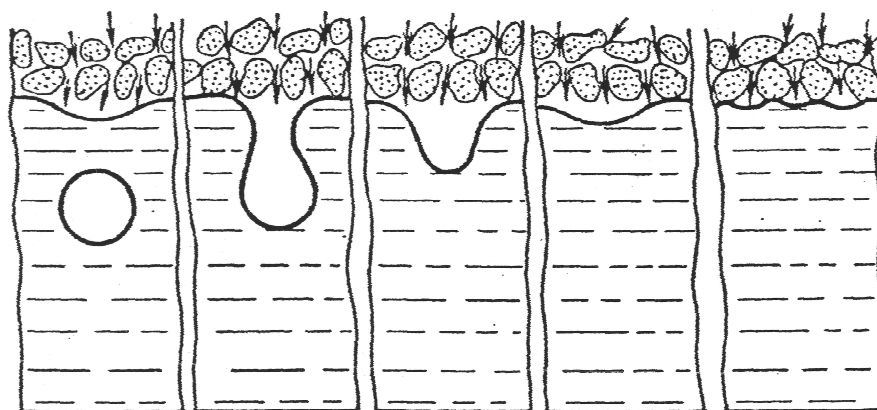
P_m - metalostatický tlak,

P_p - odpor kovu proti vniknutí plynové bubliny,

P_{pf} - přetlak plynů nad hladinou roztaveného kovu.

Lze očekávat největší rychlost vývinu plynů v okamžiku styku roztaveného kovu s formou, při počátku lití, kdy je malá tloušťka ztuhlého kovu a malý metalostatický tlak.

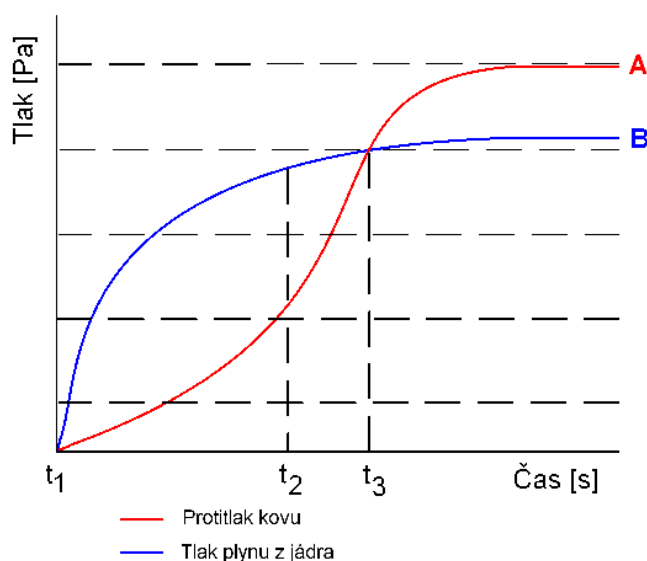
Plynatost směsí je považována jen za jednu, dílčí vlastnost směsi. Umožňuje vzájemné srovnání různých materiálů. Ve skutečnosti je však nutné spojovat hodnotu plynatosti s ostatními podmínkami, např. prodyšností směsí, styčnou plochou jádra s kovem, průřezem známek, metalostatickým tlakem atd. Tedy nikoliv vlastnost směsi, ale jeden z dílčích vlivů složitého pochodu vzniku plynových vad. Aby plyny pronikaly kovem, musí být jejich tlak v daném okamžiku větší, než je tlak kovu. Vývoj plynů v jádře je nejintenzivnější v prvních okamžicích po odlití formy a proto je vznik plynových defektů v prvních sekundách nejpravděpodobnější. Tlak plynů v jádře závisí na geometrických charakteristikách jádra, např. na velikosti plochy styku mezi jádrem a kovem, dále na délce dráhy filtrace plynu v jádru, zkrátíme-li délku dráhy plynů, silně poklesne tlak plynů.



Obr. 2. 3 Schematické naznačení vniknutí plynu do taveniny [3]

Na obr. 2.4 je schematicky znázorněna souvislost mezi vývojem tlaku plynu a tvorbou plynových bublin pro odlitek s jádrem. Jakmile tekutý kov pokryje jádro (čas t_1), začíná se vyvíjet tlak plynu, jehož průběh odpovídá křivce B. Od stejného času roste se stoupající hladinou kovu nad jádrem protitlak tekutého kovu, který odpovídá křivce A. Mezi t_1 a t_3 je tlak plynu vyšší než protitlak kovu a tím vzniká plyn do kovu. Vliv povrchového napětí kovu, který je při velkých bublinách malý, je zde zanedbán.

Dokud je kov tekutý, může plyn odcházet, což se projevuje „varem“ kovu. Při začátku tuhnutí je však docílen kritický časový bod, od kterého mohou být plynové bubliny uzavřeny (mezi t_2 a t_3). Od t_3 už není žádné nebezpečí vzniku plynových



Obr. 2. 4 Tlakové poměry při vzniku plynových vad [7]

bublin, protože tlak plynu je nižší než tlak kovu. Začne-li tuhnutí po t_3 , tzn. teprve po periodě vaření, pak se v odlitku nemohou tvořit vady, protože bubliny nejsou uzavřeny. Tento případ je v praxi velmi častý: kov se krátkodobě vaří, pak tlak kovu rychle převyší vzniklý tlak plynu (zpravidla ještě dlouho předtím než začne tuhnutí). Odlitek sice neobsahuje žádné bubliny, ale perioda vaření může způsobit jiné vady vlivem intenzivního pohybu kovu, kdy mohou vzniknout oxidy, které mohou být v kovu uzavřeny [2].

2.2.3 Vznik plynových bublin v odlitku

O vzniku plynových bublin v odlitku rozhoduje řada činitelů uplatňujících se vždy současně. Tyto činitele můžeme rozdělit do 3 skupin týkajících se:

- a) **formovacího materiálu** - druh pojiva a jeho množství, vlhkost a navlhlost, zrnitost, způsob sušení, prodyšnost;
- b) **druhu jader** - styčná plocha jádra s kovem, poměr povrchu jádra k jeho průřezu;
- c) **účinku kovu** - kinetika vývoje plynu, metalostatický tlak, vazkost kovu, rychlost lití.

Při analýze činitelů, které mohou být příčinou plynových vad je zřejmé, že existují tři nejúčinnější způsoby, jimiž lze nebezpečí negativního účinku vylučování plynů z forem a jader snížit:

A) Vhodné řízení sušení jader. Ke snížení plynatosti se doporučuje sušit jádra na teploty co možná nejvyšší. Ovšem zisk zmenšené plynatosti může vyvolat nepříjemný pokles pevnosti. Pokles pevnosti je mnohem strmější než pokles plynatosti. Nebezpečí zhodnocení jádra jeho přesušením je mnohem větší, než zisk menší plynatosti, jejíž úbytek není v poměru ke snížení pevnosti. Je třeba tedy dát přednost výběru pojiv před úpravou sušících podmínek.

B) Regulace prodyšnosti a vhodný odvod plynů. Regulace prodyšnosti je omezena požadovanou jakostí povrchu odlitku, takže spíše musíme plynatost podřídit prodyšnosti. Výsledky měření prodyšnosti jednotlivých jádrových směsí můžeme sice porovnávat mezi sebou, ale naměřené hodnoty nám s určitostí neřeknou zda odlitek bude mít plynové vady či nikoliv.

C) Volba vhodného pojiva a jeho optimálního množství. Z předchozích úvah vyplynula potřeba volit optimální druh pojiva z hlediska jejich plynatosti a potřebné obsahové množství ve směsi. Stupeň vývoje plynů u jednotlivých druhů jádrových směsí především na bázi syntetických pryskyřic bude podrobněji zpracován v experimentální části této bakalářské práce. Množství pojiva je limitováno potřebou technologických a manipulačních pevností hotových jader. Jádrová směs bude tím hodnotnější, čím vyšší bude pevnost jádra a čím menší plynatost bude vykazovat při tepelném zatížení [3].

2.3 Způsoby stanovení plynatosti

Pro stanovení plynatosti formovacích a jádrových směsí byla již vypracována řada metod a na jejich základě zkonstruována různá měřicí zařízení. Rozdělují se podle způsobu vyvolání tepelného účinku na zkoušenou směs:

1. Metody přímé (provozní)

K proměřování se používají buď přímo formy či jádra/ nebo jejich části/ či speciálně upravené vzorky. Jejich ohřev se uskutečňuje přímým stykem s taveninou. Tato metoda existuje v různých variantách, které se vzájemně liší tvarem a rozměry vzorků, způsobem ohřevu taveninou (zalitím, ponořením) ale i způsobem indikace vznikajícího plynu a jeho vyhodnocováním. Tato měření umožňují získat lepší představu o chování formy (jádra) při odlévání a tuhnutí taveniny, než u metody nepřímé.

2. Metody nepřímé (laboratorní)

Při těchto simulačních postupech měření, kdy se snažíme modelovat tepelné podmínky ovlivňující chování směsí v reálném procesu odlévání forem, se uskutečňuje ohřev určité navážky zkoušené směsi převážně sálavým teplem. Pec je předem vyhřátá na stanovenou teplotu (800-1300 °C) a vzorek (řádově několik gramů) se do ní vkládá prostřednictvím keramické křemenné, příp. jiné lodičky. Prostor pece je poté uzavřen a spojen pouze s měřicím aparátem, který registruje:

- a) objem vznikajících plynů v daném časovém okamžiku;
- b) tlak vznikajících plynů v daném časovém okamžiku.

Pro stálost podmínek měření se může zavést netečný plyn, vytvářející ochrannou atmosféru.

Společným nedostatkem nepřímé metody je nemožnost postihnout skutečných poměrů a podmínek ohřevu slévárenské formy či jádra. Diference laboratorní metody se skutečnými poměry při odlévání spočívá:

- A) Není postižen vliv relativní tloušťky stěny odlitku.
- B) Není postižen vliv tloušťky stěny jádra oblitého kovu vzorek je prohříván konstantní teplotou, přičemž v reálných podmínkách je teplota prohřátí jádra (směsi) různá.
- C) Nemůže být postihnut celkový akční tlak plynů z jádra v přímé souvislosti se stavem tuhnutí (není postihnut skutečný poměr v jádře).

Pro posouzení jakosti formovacího nebo jádrového materiálu nestačí znát pouze množství, ale i časovou závislost vývinu plynů, neboť ty jsou odlitku nebezpečné pouze do doby, než se vytvoří dostatečně pevná licí kůra. Jednotlivé metody měření plynatosti nejsou dosud sjednoceny. Liší se hmotností navážky, konstrukcí měřicího zařízení, teplotami měření, vyhodnocováním naměřených hodnot atd. Z toho vyplývá, že plynatost z různých zkoušek nelze vzájemně porovnávat [8].

3. Experimentální část práce

Hlavním záměrem experimentu mé bakalářské práce bylo měření plynatosti formovacích a jádrových směsí pomocí laboratorní metody na principu ohřevu vzorku v elektrické peci a snímání časového nárůstu tlaku uvolňujících se plynů na měřicím zařízení, které bylo sestaveno na KSM TU Liberec v letech 1991-95, modernizace měřicího zařízení z cílem urychlit a zpřesnit práci s vyhodnocením naměřených dat.

3.1 Použitá metoda měření, měřicí zařízení

Z důvodu, že originální přístroje od renomovaných firem jsou velmi nákladné, byla na katedře KSM TU v Liberci v letech 1991-95 navržena a zrealizována nová metodika a nová konstrukce laboratorního zařízení na měření plynatosti směsí.

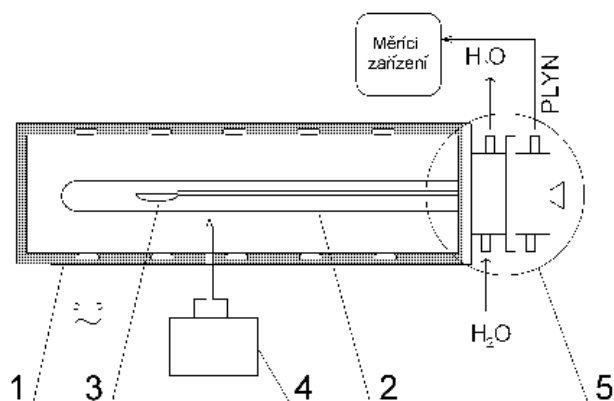
Principem je snímání tlaku uvolňujících se plynů spalováním vzorku směsi v elektrické peci. Tato metoda vychází z metodiky měření plynatosti na přístroji GF+PGD, tzn., že se v uzavřeném prostoru pece, který je spojen pouze s měřicí soustavou, ohřívá sálavým teplem vzorek zkoušené formovací nebo jádrové směsi. Na měřicím zařízení sledujeme tlak uvolňujících se plynů v daném časovém okamžiku. Funkce navrženého zařízení bylo již podrobně ověřeno a některé výsledky zpracovány v diplomových pracích BAUEROVÉ [8], NOVÁK [9]. Avšak od té doby prošlo zařízení i několika konstrukčními i metodickými změnami.

3.2 Charakteristika měřicího zařízení z roku 1995

Základem současného měřicího zařízení je konstrukce, která byla vyvinuta a realizována v roce 1995.

Toto laboratorní zařízení pro měření plynatosti slévárenských formovacích a jádrových směsí pracuje na principu snímání tlaku uvolňujících se plynů při zahřívání směsí. Jeho schéma je uvedeno na obr. 3.1.

Měřicí zařízení pracuje s tímto postupem: Vzorek směsi o hmotnosti $1,00 \pm 0,01$ g se ohřívá v otevřené lodičce z molybdenového plechu, což umožňuje jeho velmi rychlý ohřev již od prvních okamžiků po vložení vzorku do prostoru zatavené křemenné trubice, která je umístěná v elektrické odporové trubkové peci.



1. Elektrická odporová pec. 2. Křemenná zatavená trubice.
3. Lodička pro vzorek. 4. Regulátor pece. 5. Snímací hlavice s chlazením.

Obr. 3. 1 Blokové schéma zařízení KSM TU 1995

Zařízení umožňuje měření plynatosti při různých teplotách až do teploty přehřátí činného prostoru ($T=1300\text{ }^{\circ}\text{C}$), vyšší nastavená teplota se projeví i na vyšší rychlosti ohřevu vzorku v lodičce. Měření plynatosti se provádí minimálně 5x pro každý druh hodnocené směsi. Ze získaných pěti časových závislostí objemu uvolňujících se plynů je vyhodnocena křivka, spojující průměrné hodnoty plynatosti v jednotlivých časových okamžicích.

3.2.1 Kalibrace zařízení

Kalibrace laboratorního zařízení je provedena na základě tepelného rozkladu čistého uhličitanu vápenatého (CaCO_3), který se rozkládá při teplotách $850 - 894^{\circ}\text{C}$ podle rovnice :



CaCO_3 patří mezi tuhé alkalické zeminy a nachází se v přírodě ve dvou modifikacích jako vápenec a jako aragonit. Pro uplatnění kalibrační látky (CaCO_3) bylo nutno určit objem uvolněných plynů z rozkládajícího se zkušební vzorku čistého CaCO_3 . Objem uvolněných plynů ze zkušební vzorku byl teoreticky stanoven z rozkladné rovnice CaCO_3 podle vzorce:

$$V = \frac{(V_m \cdot m)}{(M_{CaCO_3})}, \quad (3-2)$$

kde značí: V_m – molový objem plynu;

m – hmotnost $CaCO_3$;

M_{CaCO_3} – molární hmotnost $CaCO_3$;

Pro 0,1 g navážky $CaCO_3$: $V = 22,4 \cdot \text{cm}^3$

V tabulce 3.1 jsou uvedeny hodnoty kalibrace, které byly použity pro citlivost zapisovače 0,5 V, protože ve stávajícím zařízení byl pro registraci naměřených výsledků použit liniový zapisovač.

Tab. 3. 1 Hodnoty kalibrace pro citlivost zapisovače 0,5 V

Hmotnost $CaCO_3$ (g)	Teoretický objem (cm^3)	Hodnota zapisovače (mm)	Cejchovní hodnota ($\text{mm} \cdot \text{cm}^3$)
0,05	11,2	56	5
0,1	22,4	103	4,59
0,15	33,6	162	4,82
Převodní konstanta: $1 \text{ cm}^3 = 4,8 \text{ mm}$			

Z výše uvedených údajů byla stanovena převodní konstanta pro přepočet maximální naměřené hodnoty tlaku na objem uvolněných plynů $1 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1} = 4,8 \text{ mm}$.

V průběhu používání tohoto zařízení byly zjištěny tyto nedostatky, které bylo nutné odstranit před modernizací stávajícího měřícího zařízení:

- a) špatný odečet naměřených hodnot z liniového zapisovače;
- b) nepojení tlakového čidla s PC;
- c) vliv výchyly při vsunutí lodičky do zařízení.

3.3 Návrh nové konstrukce zařízení

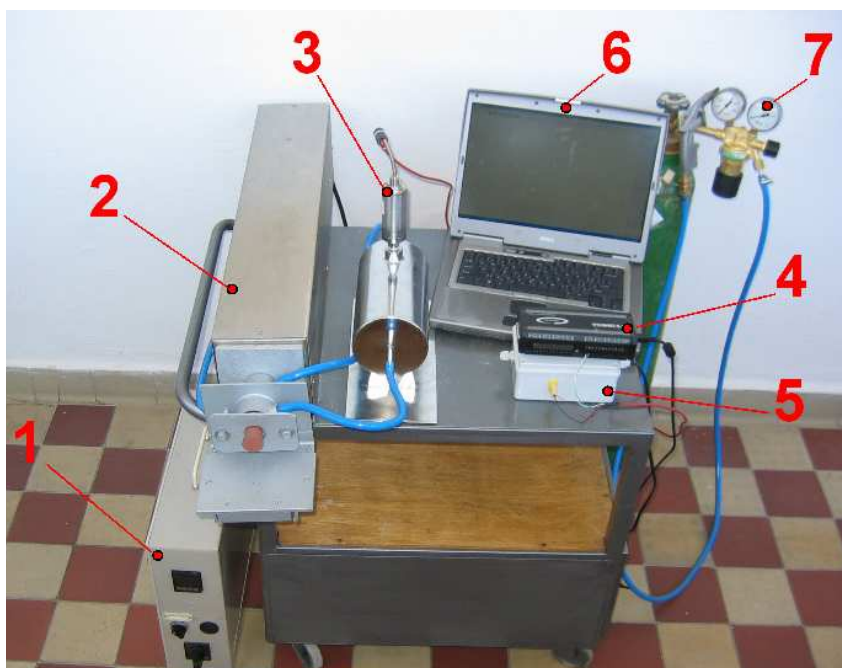
Na základě nedostatků, které byly na zařízení zkonstruovaném v roce 1995, byla v roce 2006 provedena rozsáhlá rekonstrukce zařízení obr. 3.2. Současná moderní zařízení vyžadují využití výpočetní techniky, resp. registraci výsledků

prostřednictvím PC, což čidlo osazené na starém zařízení neumožnilo. Základem renovace zařízení byla i změna tlakového čidla, která si vyžádala registraci výsledků na PC.

Proto bylo zakoupeno nové čidlo snímání uvolňujících se plynů, které bylo již možné napojit přes sběrnici dat do PC a tím i zjednodušit práci a vyhodnocení naměřených dat.

3.3.1 Popis nově zkonstruovaného měřícího zařízení

Nejprve bylo nutné překontrolovat těsnost soustavy, proto bylo celé měřící zařízení rozebráno a vyčištěno. Byl zhotoven nový kryt pece, změněna elektroinstalace a napojení termočlánku na regulátor pece (1). Nové čidlo (3) bylo osazeno do stabilizační nádoby, která je propojena s prostorem křemenné trubice. Čidlo je napájeno DC zdrojem (5) a je spojeno přes sběrnici dat (4) s PC (6). K profukování spalovacího prostoru byl zaveden inertní plyn (7). Po sestavení nové měřící aparatury a provedení zkušebního měření byl vytvořen program pro vyhodnocení naměřených dat.



Obr. 3. 2 Schéma zmodernizovaného zařízení KSP TUL

3.3.1.1 Tlakové čidlo měřící soustavy

Tlakové čidlo PXM02MC-160mBARG5T (obr. 3.3) je čidlo, které odpovídá požadavkům na snímání tlaku uvolňujících se plynů. Vyznačuje se vysokou



přesností, rozsah měření je 0 – 160 mbar. Je napájeno 24 – 32 Vdc zdrojem. Lze pomocí konektoru jednoduše připojit ke sběrnici dat (obr.3.4) a tím zjednodušit přenos dat do PC.

Obr. 3. 3 Čidlo PXM02MC

3.3.1.2 Sběrnice dat OMB-DAQ-56 a její ovládací program DaqView

Sběrnice dat OMB-DAQ-56 je univerzální sběrnice (viz obr.3.4) pro sběr dat, kterou lze připojit pomocí univerzální sériové linky téměř ke každému osobnímu



počítači. Vyznačuje se vysokou přesností s 22-bitovým rozlišením. K sběrnici lze pro přímé měření připojit napěťové, frekvenční, pulzní, termočláňkové a digitální vstupy. Jednoduchým připojením k PC pomocí kabelu je zajištěn jak rychlý přenos dat, tak i napájení jednotlivých modulů.

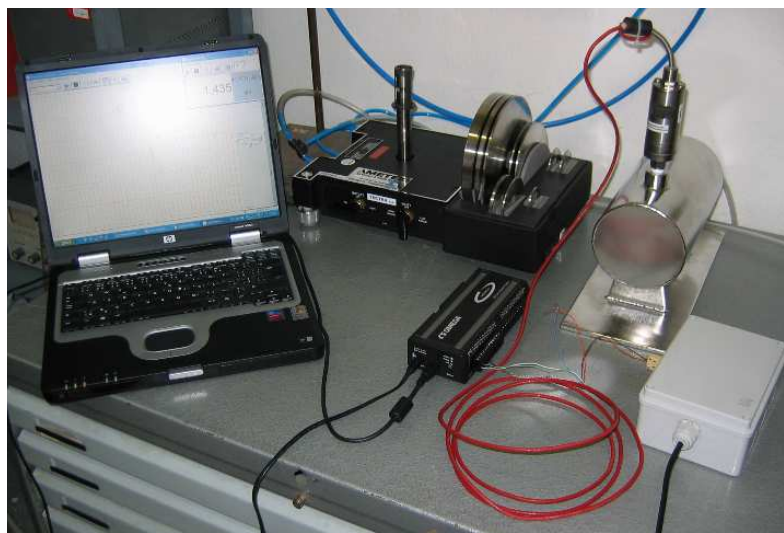
Obr. 3. 4 Sběrnice dat OMB-DAQ-56

Univerzální sériová linka USB slouží pro spojení osobního počítače (notebooku) se sběrnicemi. Systém OMB-DAQ-56 překonává různá omezení zejména PCMCIA karet. Systém OMB-DAQ-56 má 20 jednoduchých, nebo 10 diferenčních analogových, nebo termočláňkových vstupů, 8 digitálních V/V kanálů a 2 frekvenční kanály.

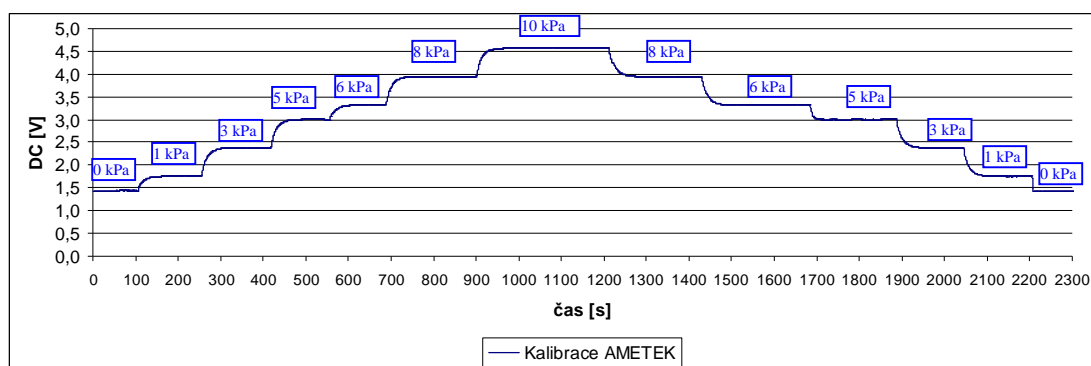
3.3.2 Kalibrace zařízení

Kalibrace zařízení byla provedena pomocí zátěžové pumpy AMETEK (obr.3.5) na Katedře energetických zařízení na TU v Liberci, čímž byl předpoklad, že kalibrace bude provedena velmi odborně. Změna vstupního tlaku byla určována pomocí kalibračních závaží v rozsahu 1 – 10 kPa. Výstupní hodnoty napětí byly zobrazeny a zaznamenány v softwaru daqView. Jako kontrola výstupní hodnoty

napětí byl do soustavy zapojen i digitální multimetr. Záznamy změn výstupního napětí při prováděné kalibraci jsou zobrazeny na obr. 3. 6.

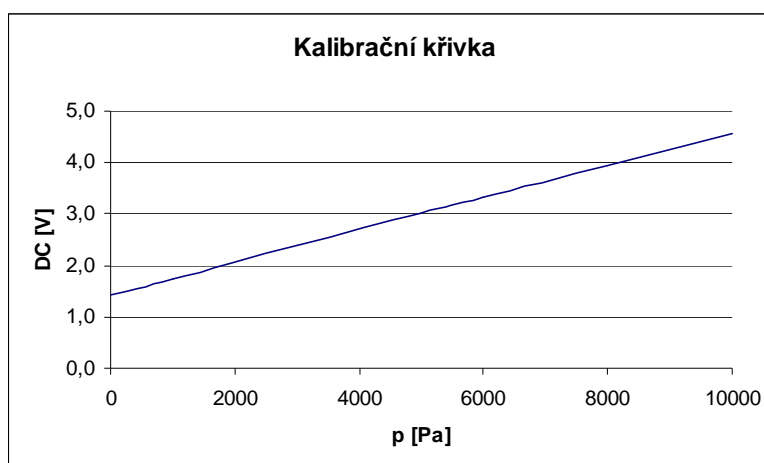


Obr. 3. 5 Kalibrace snímače pomocí zátěžové pumpy AMETEK



Obr. 3. 6 Záznam kalibrace čidla pomocí zátěžové pumpy AMETEK

Na základě záznamu kalibrace čidla pomocí kalibrační zátěžové pumpy (AMETEK) byla sestrojena kalibrační křivka výstupního napětí při změně tlaku (obr.3.7). Pro změnu tlaku 1Pa způsobené změnou objemu plynu v měřící soustavě byla vypočtena kalibrační konstanta pro $1 \text{ Pa} = 0,00031225 \text{ V}$.



Obr. 3. 7 Kalibrační křivka

Ze stavové rovnice ideálního plynu (3-3) vychází vztah pro změnu tlaku Δp (3-4) při změně objemu,

$$p \cdot v = r \cdot T \quad (3-3)$$

$$\Delta p = \left(\frac{\Delta V}{V_0} \right) \cdot p_a \quad (3-4)$$

kde značí: Δp – změna tlaku;

ΔV – změna objemu;

V_0 – objem měřicí soustavy;

P_a – atmosferický tlak.

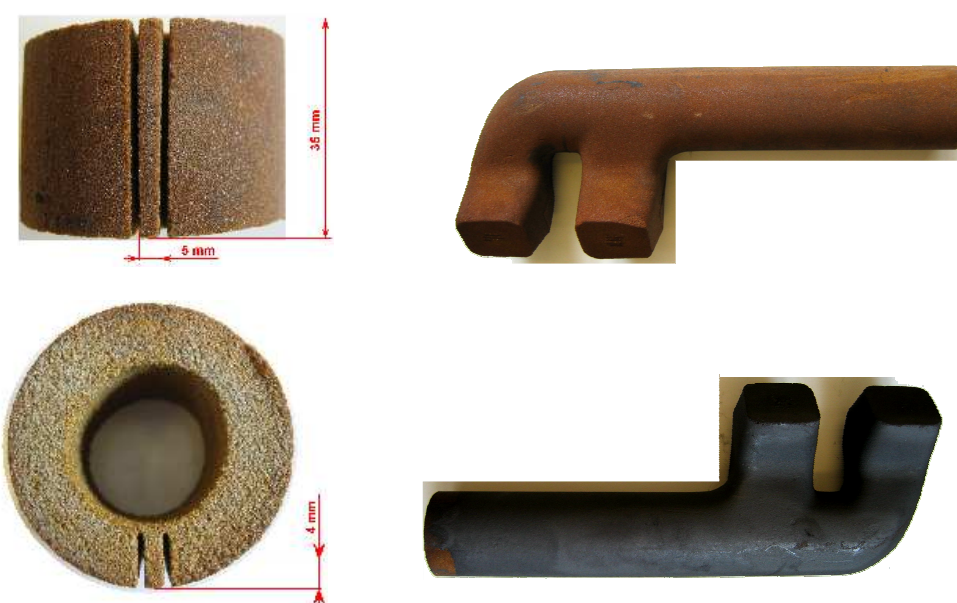
Z rovnice (3-4) byla spočítána převodní konstanta. Při změně objemu o 1 cm^3 v měřicí soustavě laboratorního zařízení dojde ke změně tlaku o 48,5 Pa.

3.4 Měření plynatosti jádrových a formovacích směsí

3.4.1 Směs pro měření plynatosti

Pro měření plynatosti v mém experimentu byla použita obalová směs typ 15947 od firmy Hüttenes – Albertus CZ s.r.o. Tuto směs dodává do slévárny Česká železářská společnost s.r.o. – provozovna FEREX Casting v Liberci, která tuto

směs pro měření plynatosti poskytl. Výrobce sice udává u každé směsi množství spalitelných látek, ale tyto hodnoty nemají přímý vliv na plynatost této směsi jak uvádí ve své práci NOVÁK [9]. Tato směs byla použita pro obě měřicí zařízení. V příloze č. 1 jsou uvedeny základní charakteristiky směsi poskytnuté výrobcem. Zkušební jádérka o hmotnosti $1,00 \pm 0,01\text{g}$ byla připravena z hotových jader. Jádra byla opatřena grafito-sazo-lihovým nátěrem. Údaje o složení dle vnitřního předpisu ČŽS s.r.o. jsou uvedeny v příloze č. 2. Na obr. 3.8 je uveden odběr kompaktních jadérek z hotových jader.



Obr. 3. 8 Jádro použité pro odběr zkušebních jadérek

3.4.2 Postup měření plynatosti

Všechny experimenty měření plynatosti měly tuto metodiku: Nejdříve byla ověřena funkce měřicího zařízení, na analytických vahách s přesností 0,001 g byl navážen vzorek směsi, který byl vložen na lodičku z molybdenového plechu. Tato lodička byla vložena do prostoru pece vyhřátého na příslušnou teplotu dle stanovených podmínek. V okamžiku vsunutí lodčky do pece bylo spuštěno registrační zařízení pro sledování časového vývinu plynatosti použité navážky.

3.5 Popis prováděného měření plynatosti

Sledování plynatosti jádrové směsi bylo rozděleno do těchto skupin:

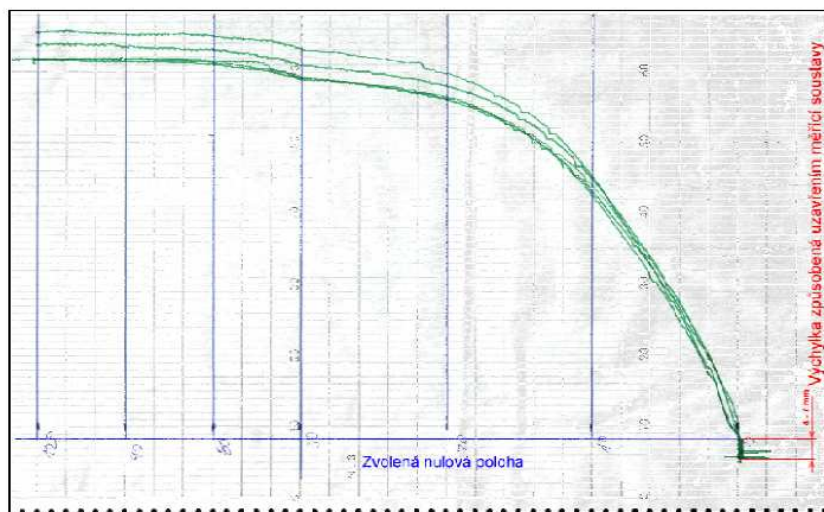
1. Měření plynatosti běžného vzorku jádrové směsi při teplotě 1000 °C. K tomuto účelu byla použita obě měřicí zařízení.
2. Měření plynatosti jednotlivých frakcí jádrové směsi. Frakce byly stanoveny běžně prováděným síťovým rozborem. Teplota přehřevu byla 1000 °C. K tomuto účelu bylo použito zařízení staré konstrukce.
3. Měření plynatosti jádrové směsi, která již byla zpracována do tvaru jader a z těchto jader byl odebrán vzorek, viz obr. 3.8 o hmotnosti $1,00 \pm 0,01$ g. Byly použity jádra s grafitovým nátěrem a bez nátěru. Sledování plynatosti v této skupině experimentů bylo provedeno při teplotě 800, 1000, 1200 °C. Současně byla sledována i plynatost běžného vzorku této směsi. K měření bylo použito nové měřicí zařízení.
4. Měření plynatosti bylo provedeno postupným ohřevem vzorku jádrové směsi a jádra při ustálených teplotách 200, 400, 600, 800 a 1000 °C. Průběh ohřevů je velmi dobře patrný z obr. 3.16. K tomuto účelu bylo použito nové měřicí zařízení.

3.5.1 Měření plynatosti běžného vzorku

Kromě velikosti plynatosti směsi byla sledována i její výrobní kvalita „časová“ stálost. Proto bylo provedeno celkem 5 měření po dobu 5 týdnů. Každý týden byla odebrána nová část směsi, která byla změřena. Měření plynatosti bylo na obou typech zařízení.

3.5.1.1 Shrnutí výsledků měření plynatosti běžného vzorku

Na obr. 3.9 je zaznamenán průběh měření na liniovém zapisovači (zařízení KSM TUL). Z naměřených výsledků měření je zřejmé, že k vývinu plynů z hodnocené směsi dochází v podstatě od okamžiku uložení lodičky se vzorkem do vyhřátého prostoru pece. Rychlost vývinu je právě v těchto okamžicích maximální a objem plynů narůstá v časovém intervalu prakticky lineárně. Zde se projevilo rozdílné měření obou metod nejvíce. Průměrné hodnoty měření plynatosti jsou uvedeny v tab. 3.2.



Obr. 3. 9 Průběh měření plynatosti na liniovém zapisovači.
(konstrukce zařízení z r. 1995)

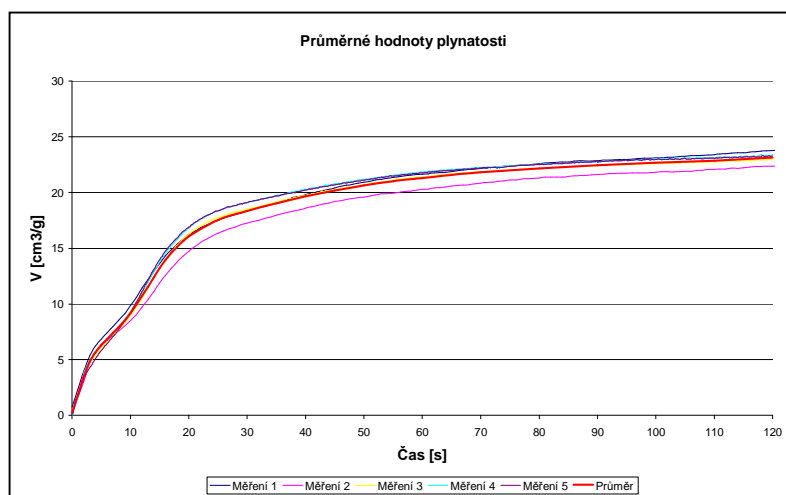
Tabulka 3. 2 Průměrné hodnoty plynatosti změřené pomocí přístroje staré konstrukce

Čas [s]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vpl [cm³/g]	1,911	3,577	4,872	5,755	6,474	7,054	7,581	8,158	8,756	9,428
Čas [s]	12	14	16	18	20	25	30	60	90	120
Vpl [cm³/g]	10,942	12,660	14,235	15,483	16,472	17,998	18,808	21,804	23,038	23,790

V tab. 3.3 jsou zaznamenány průměrné hodnoty plynatosti směsi měřené na novém přístroji. Na obr. 3.10 jsou zobrazeny časové průběhy plynatosti směsi měřené na novém přístroji, v příloze č. 3 jsou uvedeny časové průběhy plynatosti směsi.

Tabulka 3. 3 Průměrné hodnoty plynatosti změřené pomocí přístroje nové konstrukce

Čas [s]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vpl [cm³/g]	1,871	3,517	4,782	5,655	6,324	6,854	7,381	7,928	8,516	9,178
Čas [s]	12	14	16	18	20	25	30	60	90	120
Vpl [cm³/g]	10,742	12,410	13,935	15,133	16,072	17,548	18,358	21,304	22,438	23,040



Obr. 3. 10 Průběh plynatosti směsí měřené na novém přístroji

3.5.2 Měření jednotlivých frakcí směsi

Jednotlivé podíly frakcí byly získány pomocí síťového rozboru. Ukázka síťového rozboru je uvedena v příloze č. 4. Zkušební síta pro tuto zkoušku byla odstupňována: 1.5, 1, 0.75, 0.6, 0.4, 0.3, 0.15, 0.1, 0.06, 0.02.

Hmotnost jednotlivé dávky byla 50 g, doba vysívání byla zvolena na 12 až 15 minut. Počet výsevů bylo celkem 10. Pro zkoušku plynatosti je potřeba minimálně 5g každé frakce, proto byly potřeba vždy dva výsevy. Z důvodu celkového posouzení plynatosti jednotlivých frakcí bylo také nutné určit kromě zrnitosti (vzájemných podílů) dle součtové křivky i měrný povrch frakce, povrch 1g frakce, měrný počet zrn ve frakci a počet zrn 1g frakce dle vztahů [4].

Povrch všech částic ve frakci:

$$S_{wi} = N_i \cdot S_{ci} = 2,26 \cdot \frac{m_i}{d_i} \quad [\text{cm}^2] \quad (3-5)$$

Povrch 1 g frakce:

$$S_{gi} = \frac{S_{wi}}{m_i} \quad [\text{cm}^2 \cdot \text{1g}^{-1}] \quad (3-6)$$

Měrný povrch frakce:

$$S_{mi} = \frac{S_{wi}}{m_c} \quad [\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}] \quad (3-7)$$

Počet částic zrn ve frakci:

$$N_i = \frac{m_i}{m_{ci}} \quad [\text{ks}] \quad (3-8)$$

Počet zrn 1 g frakce:

$$N_{gi} = \frac{N_i}{m_i} \quad [\text{ks} \cdot \text{g}^{-1}] \quad (3-9)$$

Měrný počet zrn ve frakci:

$$N_{mi} = \frac{N_i}{m_c} \quad [\text{ks} \cdot \text{g}^{-1}] \quad (3-10)$$

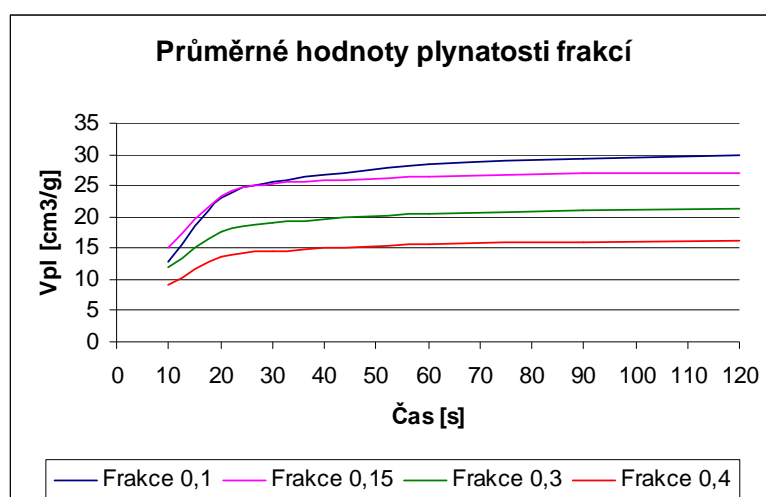
Pro měření plynatosti byly zvoleny podíly: 0.4, 0.3, 0.15, 0.1. Součet těchto frakcí se pohyboval od 99-99,2%, proto bylo možné ostatní podíly frakce zanedbat.

3.5.2.1 Shrnutí výsledků měření plynatosti frakcí směsi

Měření bylo provedeno při $T = 1000^\circ\text{C}$, čas měření $t = 120\text{s}$. Na obr. 3.11 jsou zaznamenány průběhy plynatosti frakcí, v tab. 3.4 jsou zaznamenány průměrné výsledky měřených frakcí, v tab. 3.5 jsou výsledky měřených hodnot plynatosti, v příloze č. 5 jsou zaznamenány jednotlivé průběhy všech frakcí.

Tabulka 3. 4 Průměrné hodnoty plynatosti frakcí [cm^3/g]

Čas [s]	10	20	30	60	90	120
Frakce 0,1	12,9	22,9	25,6	28,3	29,4	29,8
Frakce 0,15	15,2	23,3	25,2	26,5	27,0	27,1
Frakce 0,3	11,9	17,7	19,1	20,5	21,1	21,4
Frakce 0,4	9,2	13,5	14,5	15,6	16,1	16,3



Obr. 3.11 Průběh plynatosti frakcí

Tabulka 3. 5 Výsledky plynatosti frakcí

Třída zrnitosti	Hmotnost frakce m _i [g]	V _{pl} ^{pl} [cm ³ /g]	V _{pl} /S _{gi}	V _{pl} /N _{gi}	V _{pl} směsi [cm ³ /g]	V _{pl} /ΣS _{mi}	V _{pl} /ΣN _{mi} [mm ³]
Měření č.1 - 20.03.2006							
0,6 - 0,4	5,6	14,8512	0,32857	0,00255	26,166814	0,283591	0,441868
0,4 - 0,3	20	21,1328	0,32728	0,00124			
0,3 - 0,15	70,6	28,2464	0,28121	0,00044			
0,15 - 0,1	2,8	32,32	0,17876	0,00009			
Měření č.2 - 27.03.2006							
0,6 - 0,4	6,2	16,8064	0,37182	0,00288	26,15556	0,278807	0,403603
0,4 - 0,3	18	21,008	0,32535	0,00124			
0,3 - 0,15	70,8	28,1632	0,28039	0,00044			
0,15 - 0,1	4,5	28,04	0,15509	0,00008			
Měření č.3 - 3.04.2006							
0,6 - 0,4	6,5	16,016	0,35434	0,00275	26,129233	0,279182	0,402979
0,4 - 0,3	18,1	21,2992	0,32985	0,00125			
0,3 - 0,15	69,6	28,1632	0,28039	0,00044			
0,15 - 0,1	4,6	28,65	0,15846	0,00008			
Měření č.4 - 10.04.2006							
0,6 - 0,4	6,5	17,68	0,39115	0,00303	26,849228	0,284619	0,403501
0,4 - 0,3	17,4	24,544	0,38011	0,00144			
0,3 - 0,15	70,1	28,08	0,27956	0,00044			
0,15 - 0,1	5	29,536	0,16336	0,00008			
Měření č.5 - 17.04.2006							
0,6 - 0,4	6,7	16,3488	0,36170	0,00280	25,914119	0,276904	0,394545
0,4 - 0,3	18,6	20,19	0,31268	0,00119			
0,3 - 0,15	68,5	28,088	0,27964	0,00044			
0,15 - 0,1	5	30,2432	0,16727	0,00008			

kde značí: V_{pl} – objem uvolněných plynů frakce;

V_{pl} / S_{gi} – objem uvolněných plynů frakce vztažený na povrch 1g frakce;

V_{pl}/N_{gi} – objem uvolněných plynů frakce vztažený na počet zrn 1g příslušné frakce;

$V_{pl}/\sum S_{mi}$ – objem uvolněných plynů směsi vztažený na měrný povrch všech frakcí (teoretický povrch směsi);

$V_{pl}/\sum N_{mi}$ – objem uvolněných plynů směsi vztažený na měrný počet všech zrn (teoretický počet zrn).

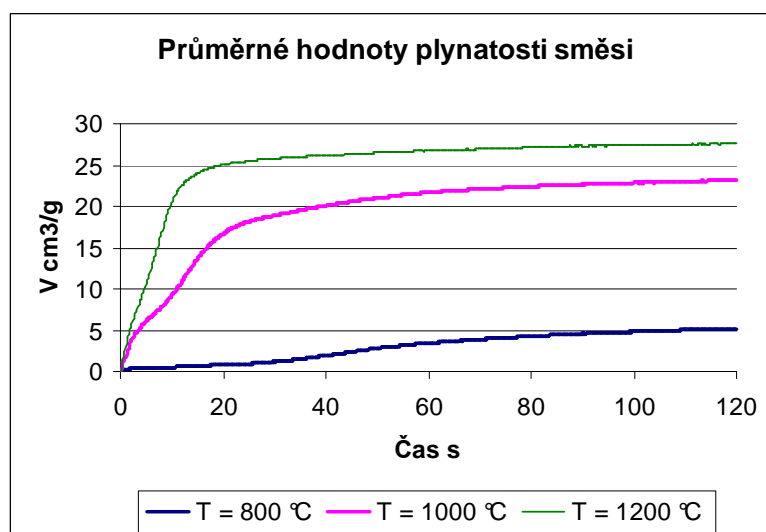
3.5.3 Měření za různých teplot ohřevu vzorků

Měření plynatosti při teplotách $T = 800, 1000, 1200$ °C bylo provedeno jak pro zkušební jádra tak i pro směs. Měření plynatosti na celistvých vzorcích lépe vystihuje skutečnost při vývinu plynů ve slévárenské formě, rychlost prohřívání skutečných jader ve slévárenské formě je odlišná od prohřívání sypké navážky směsi. Lze předpokládat, že kompaktní vzorky (jádérka) lépe postihují skutečné podmínky při vývinu plynů. Důležitou předností je i možnost nanášení nátěrových hmot na tělíska a tudíž zkoumání vlivu jádrových nátěrů na plynatost.

3.5.3.1 Shrnutí výsledků měření plynatosti za různých teplot ohřevu

Jednoznačně vyplynula okolnost, že teplota ohřevu se projevuje nárůstem hodnot plynatosti s vyšší teplotou u směsi, přičemž relace mezi jednotlivými zkoušenými vzorky je zhruba zachována.

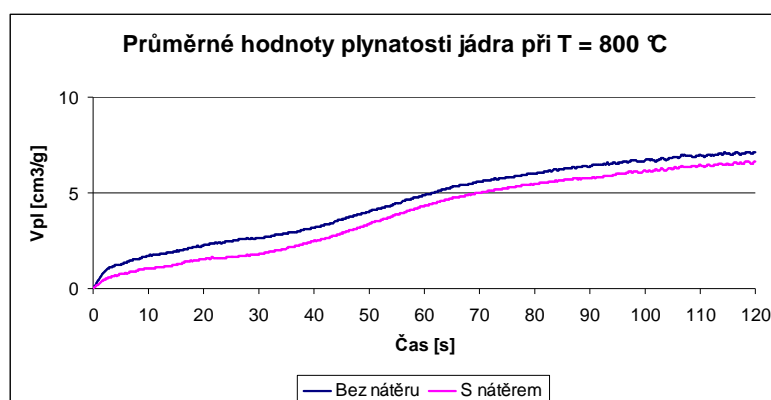
Na obr. 3,12 jsou zaznamenány časové průběhy průměrné hodnoty plynatosti směsi při různých teplotách ohřevu. V tab. 3.6 jsou zaznamenány průměrné hodnoty plynatosti směsi při různých teplotách. Pro měření plynatosti jader při změně teploty byly použity jádérka bez nátěru i s nátěrem. Na obr. 3,13; 3,14; 3,15 jsou zaznamenány průběhy měření plynatosti jáderek s nátěrem a bez nátěru. Výsledky měření plynatosti jsou uvedeny v příloze č. 6.

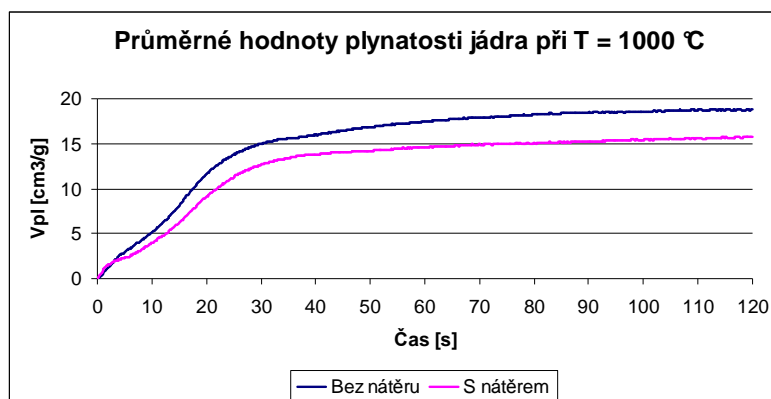
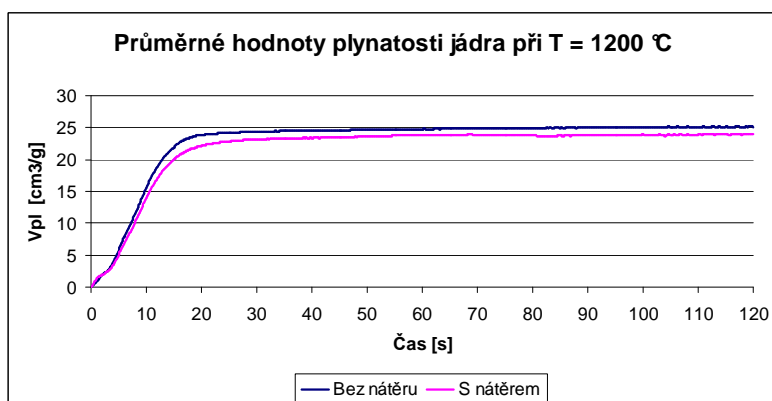


Obr. 3. 12 Průběh plynatosti směsi při různých teplotách ohřevu

Tabulka 3. 6 Průměrné hodnoty plynatosti směsi při různých teplotách ohřevu
[cm³/g]

Čas [s]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
800 °C	0,245	0,331	0,382	0,404	0,431	0,438	0,464	0,468	0,464	0,517
1000 °C	1,757	3,528	4,606	5,415	6,088	6,623	7,188	7,787	8,455	9,166
1200 °C	2,916	5,344	7,147	8,822	10,566	12,502	14,576	16,724	18,730	20,480
Čas [s]	12	14	16	18	20	25	30	60	90	120
800 °C	0,567	0,651	0,710	0,750	0,775	0,927	1,171	3,436	4,562	5,176
1000 °C	10,904	12,785	14,428	15,689	16,662	18,165	18,910	21,654	22,635	23,219
1200 °C	22,508	23,633	24,313	24,743	25,076	25,484	25,776	26,723	27,335	27,678

Obr. 3. 13 Průběh měření plynatosti jádra při teplotě $T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$

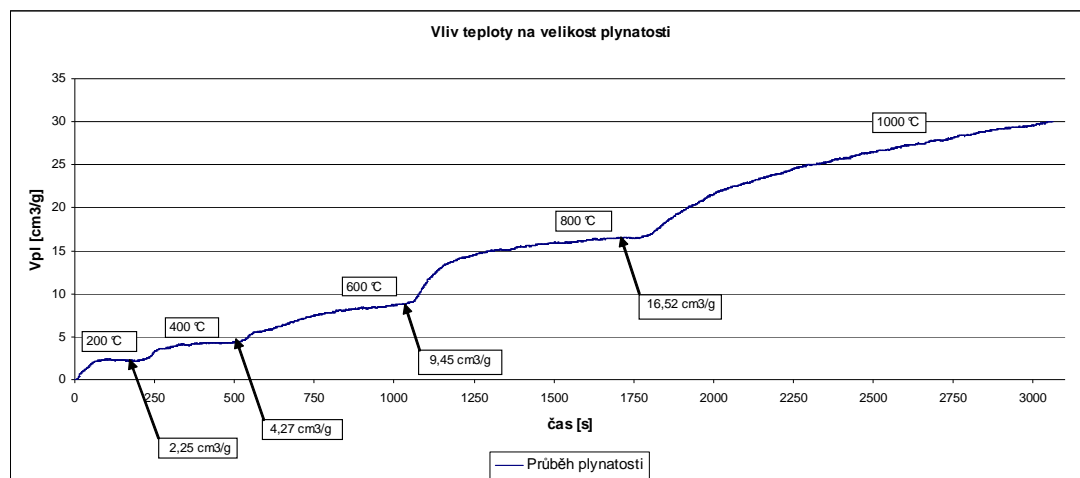
Obr. 3. 14 Průběh měření plynatosti jádra při teplotě $T = 1000\text{ °C}$ Obr. 3. 15 Průběh měření plynatosti jádra při teplotě $T = 1200\text{ °C}$

3.5.4 Měření při změně teploty: $T = 200 - 1000\text{ °C}$

Aby byl vystižen vliv teplotních rozdílů, které vznikají ve slévárenské formě, bylo provedeno zkušební měření směsi při které byl sledován vliv změny teploty na velikost plynatosti směsi. Teplota předeřevu se měnila po 200 °C , vždy až po dosažení konstantní hodnoty plynatosti.

3.5.4.1 Shrnutí výsledků měření při změně teploty

Průběh plynatosti je zachycen na obr. 3.16. Z obrázku je zřejmé, že do teploty cca 600 °C je reakce směsi (pojiva) na změnu teploty ohřevu velmi nízká, má téměř lineární průběh. Po zvýšení teploty nad 600 °C resp. i nad teplotu 800 °C se tlak uvolněných plynů výrazně zvýšil – tedy i velikost plynatosti směsi.



Obr. 3. 16 Vliv teploty na velikost plynatosti

4. Diskuze výsledků

Výsledky obsažené v této bakalářské práci přináší komplexní hodnoty plynatosti obalové směsi 15 947 od firmy Hüttenes Albertus CZ. Měřicí zařízení prošlo mnohými inovačními změnami, bylo zkonstruováno, zmodernizováno a vytvořeno „nové“ měřicí zařízení „KSP TUL 2006“.

A) Pokud hodnotím vliv přesnosti „nového“ a „starého“ zařízení, musím konstatovat, že obě měřicí zařízení jsou vhodné pro měření plynatosti (dále jen V_{pl}).

Při měření na starém zařízení dochází již při odečtu k první chybě měření. Ta je způsobena nutností odečítat jednotlivé hodnoty z grafu liniového zapisovače. Druhá chyba je způsobena tloušťkou pera zapisovače a překrytím jednotlivých naměřených křivek. Třetí chyba je způsobena vsunutím lodičky do křemenné trubice, tato výchylka, která se nedá odstranit je ovšem při každém vsunutí rozdílná a výsledné hodnoty se špatně odečítají. Počet odměřených hodnot z grafu je 20, což je nedostatečné a nedokáže přesně zaznamenat průběh plynatosti při přenesení dat.

Velikost a vliv chyby, která vzniká při zapisování na liniový zapisovač je až $2 \text{ cm}^3/\text{g}$. V této souvislosti je nutno uvést, že tento typ laboratorního zařízení slouží k porovnání velikosti V_{pl} a tedy absolutní hodnota V_{pl} není tak důležitá na rozdíl od časového průběhu plynatosti, který z hlediska predikce vzniku plynových vad v odlitku je důležitější.

Jako velmi vhodné se ukázalo připojení nového snímače uvolňujících se plynů do PC na novém zařízení, chyby měření byly odstraněny možností vyhodnotit a zaznamenat hodnoty měření na PC. Přínosem v metodice a hodnocení velikosti V_{pl} bylo především zpracování naměřených dat v PC, počet záznamů měření se zvýšil při zvoleném času měření pro $t = 120$ až na hodnotu 600 záznamů na jedno měření.

Chyba, která vzniká při vsunutí lodičky do křemenné trubice je odstraněna pomocí softwaru.

Velikost V_{pl} směsi při $T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ na starém zařízení byla 23,79; na novém zařízení 23,04 [cm^3/g].

B) Vlastnosti formovací směsi v nemalé míře závisí od granulometrické skladby ostřiva. Jako nejvhodnější model pro sledování plynatosti jednotlivých frakcí disperzní soustavy a vliv jejího zastoupení, byla zvolena soustava obalované směsi

pro Croningovu metodu. Byly vybrány frakce 0,4; 0,3; 0,15 a 0,1.

Z výsledků měření jednotlivých frakcí byla spočítána celková plynatost směsi, která byla porovnána s plynatostí směsi. Z hlediska „časové“ kvality nebyly zjištěny žádné rozdíly.

Průměrná velikost V_{pl} frakce 0,4 je 16,3; frakce 0,3 je 21,4; frakce 0,15 je 27,1; frakce 0,1 je 29,8 [cm^3/g]. Průměrná hodnota plynatosti spočítána dle zjištěných výsledků V_{pl} frakcí je 26,24 [cm^3/g], hodnota V_{pl} směsi je 23,14 [cm^3/g].

Domnívám se, že z hlediska absolutní hodnoty je velikost V_{pl} zjištěná pomocí výpočtů V_{pl} jednotlivých frakcí přesnější.

Z naměřených hodnot vyplývá, že se snižující třídou zrnitosti roste velikost plynatosti jednotlivé frakce. Sice se snižuje velikost plynatosti na jednotku plochy frakce (S_{gi}), z toho vyplývá že „skořápka“ pojiva je menší než u zrn s vyšší třídou zrnitosti, ale v důsledku vyššího počtu zrníček v 1g posuzované navážky se oproti ostatním frakcím plynatost zvyšuje.

C) Z měření plynatosti při různých teplotách ohřevů směsi i kompaktních jadérek vyplynula okolnost, že s vyšší teplotou ohřevu roste tlak vyvíjejících se plynů a tím i tedy velikost plynatosti. Při teplotě 800 °C byl tlak vyvíjejících se plynů přibližně o 349 % nižší a při teplotě 1200 °C o 19,2 % vyšší než za standardní teploty $T = 1000$ °C. Z těchto výsledků je zřejmé, že při teplotě 800 °C dochází k malé reakci pojiva s teplotou.

Zajímavé jsou též výsledky měřených kompaktních jadérek, které byly opatřeny grafitovým nátěrem. Tento nátěr způsobil u všech měřených vzorků jistý pokles plynatosti. Ten se projevil téměř již od začátku měření. Při teplotě 800 °C byl rozdíl mezi V_{pl} jádérka bez nátěru o 7,4 % vyšší, u 1000 °C byl 19,45 % vyšší a u teploty 1200 °C byl o 4,59 % vyšší než u V_{pl} jádérka s nátěrem.

D) Jako doplňkové měření, které doposud nebylo na starém zařízení možné provést, bylo provedeno měření směsi při předem definované změně teploty o 200 °C až do teploty přehřátí 1000 °C. Tato zkouška trvala přes 50 min a v tomto čase nedošlo k ustálení velikosti plynatosti směsi při $T = 1000$ °C, proto měření neprobíhalo až do teploty 1200 °C, jak bylo původně plánováno. Z výsledků měření bylo zjištěno, že do teploty přehřátí činného prostoru pece $T = 600$ °C nedochází

k razantní změně V_{pl} , při této teplotě byla hodnota 9,45 [cm³/g]. Výrazná změna přišla při teplotě 800 °C, kdy hodnota V_{pl} se změnila na hodnotu 16,52 [cm³/g]. Nejvýznamnější změna přišla při teplotě 1000 °C, zde došlo k nejrazantnější změně až na hodnotu 30,01 [cm³/g], musím poznamenat, že tato hodnota nebyla ustálená a nadále rostla. Z obr. 3.16 je také patrná časová závislost uvolňujících se plynů a poukazuje na dynamický nárůst tlaků resp. objemu plynu při $T = 1000$ °C.

5. Závěr

Bakalářská práce byla zpracována na téma: „Posouzení plynatosti vybrané formovací směsi“. Práce je rozdělena na dvě části – teoretickou a experimentální.

V teoretické části práce je proveden komplexní rozbor sledované problematiky, především je zde popsána charakteristika vlivu plynatosti formovací a jádrové směsi na vznik vad odlitků, vznik a vývin plynů ze směsi. Dále jsou zde popsány metody měření plynatosti.

Experimentální část práce byla zaměřena na sledování plynatosti obalové směsi. Byla provedena rekonstrukce laboratorního zařízení, připojení na PC a tím bylo zjednodušeno vyhodnocení výsledků měření. Byl proveden komplexní rozbor plynatosti této směsi.

Z bakalářské práce na základě získaných poznatků a provedení cca 200 měření lze formulovat tyto dílčí závěry:

- 1) Obě měřicí zařízení jsou schopné zaznamenat časový průběh plynatosti uvolňujících se plynů. Nově zrekonstruované zařízení je přesnější, je zjednodušena práce s vyhodnocením dat. Je osazeno novým čidlem, které je možné připojit na PC. Výsledky měření je tedy možné lépe zpracovat. Rozdíl mezi starým a novým zařízením v některých případech dosáhl až 2 [cm³/g]. Bylo to dáno hlavně chybou, která vzniká při odečítání naměřených dat z liniového zapisovače.
- 2) Velikost plynatosti směsi pro čas měření $t = 120$ [s] při teplotě 1000 °C je 23,04 [cm³/g]. Z hlediska „časové“ kvality nebyly zjištěny žádné rozdíly. Velikost plynatosti s vyšší teplotou ohřevu způsobí intenzivnější prohřátí zkoumané směsi a tím dojde k rychlejšímu vývinu plynů. Tato skutečnost poukazuje na snížení plynatosti jader použitím vhodného nátěru. Velikost plynatosti měřené na kompaktním jádru bez nátěru při teplotě 1000 °C je 18,7 cm³/g, s nátěrem je 15,7 cm³/g.
- 3) Velikost plynatosti směsi spočítané z naměřených hodnot plynatosti frakcí je vhodné pro zjištění absolutní velikosti plynatosti směsi. Z výsledků je také zřejmý vliv zastoupených frakcí ve směsi, se snižující zrnitostí frakcí roste i plynatost jednotlivých podílů. Sice se snižuje velikost plynatosti na jednotku plochy frakce (S_{gi}), z toho vyplývá že „skořápka“ pojiva je menší než u zrn

s vyšší třídou zrnitosti, ale v důsledku vyššího počtu zrníček v 1g posuzované navážky se oproti ostatním frakcím plynatost zvyšuje.

- 4) Měření plynatosti při konstatní změně ohřevu poukazuje na reaktivnost směsi s teplotou. Směs 15 947 do cca 600 °C má téměř lineární nárůst plynatosti. Při této teplotě vykazuje velikost plynatosti 9,5 [cm³/g]. Nad touto teplotou dochází k razantní změně vývinu plynů ze směsi, při teplotě 1000 °C hodnota plynatosti je 30 [cm³/g].

Pro další řešení této problematiky doporučuji proměřit nejen další typy obalových směsí od firmy Hüttenes Albertus, která tyto směsi přislíbila, ale i další typy jádrových a formovacích směsí typu HB, CB, CT a jiné.

Z důvodu, že se jedná o prvotní práci na novém zařízení, není provedeno ekonomické zhodnocení.

6. Seznam použité literatury

- [1] NOVÁ, I.: Teorie slévání. Liberec 1995.
- [2] KALOUSEK, J., HOLUBEC, Z.: Fyzikální chemie metalurgických procesů Liberec 1990.
- [3] JELÍNEK, P.: Slévárenské formovací směsi III část.1. vyd., Ostrava 1984
- [4] JELÍNEK, P.: Disperzní soustavy slévárenských formovacích směsí. 1. vyd. Ostrava 2000. ISBN 80-238-6118-2
- [5] HOLUBEC, Z., NOVÁK, R.: Plynatost formovacích a jádrových směsí a její měření na zařízení KSM TU Liberec. In.: Mezinárodní vědecká konference VŠB-TU Ostrava 1995.
- [6] VETIŠKA, A.: Teoretické základy slévárenské technologie. 2. vyd. Praha 1974
- [7] SEIDL, M.: Sledování plynatosti slévárenských formovacích směsí. Zvláštní číslo časopisu Strojírenská TECHNOLOGIE 2005, str. 160-162. ISSN 1211 - 4162.
- [8] BAUEROVÁ, M.: Měření plynatosti jádrových směsí s pryskyřičnými pojivy. Diplomová práce VŠŠT Liberec, 1992.
- [9] NOVÁK, R.: Vyhodnocení a porovnání plynatosti jádrových směsí používaných ve slévárně LIBEREC a.s. Diplomová práce TU v Liberci, 1995.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména §60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL, v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 26. 5. 2006

Podpis:

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact, in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and consultant.

Date: 26. 5 2006

Signature:

Přílohy

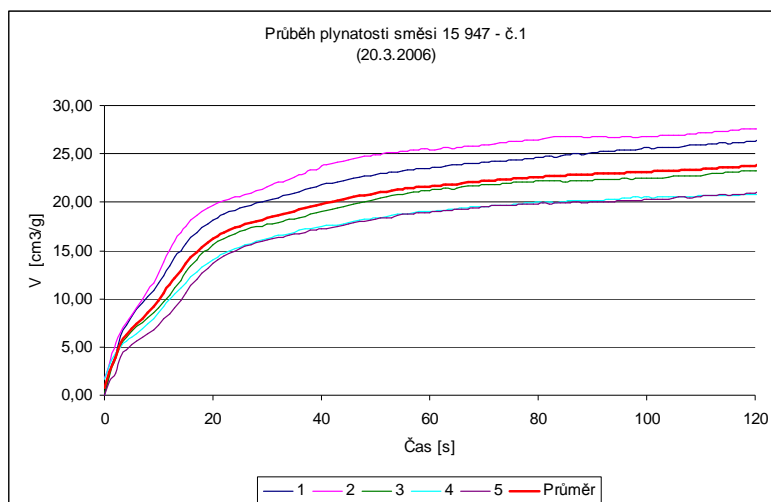
Obalová směs používaná ve slévárně Česká železářská společnost s.r.o. – FEREX
Casting v Liberci. Dodavatel Hüttenes – Albertus CZ s.r.o.

Tabulka P 1 Charakteristika směsi 15 947 uvedené dle výrobce

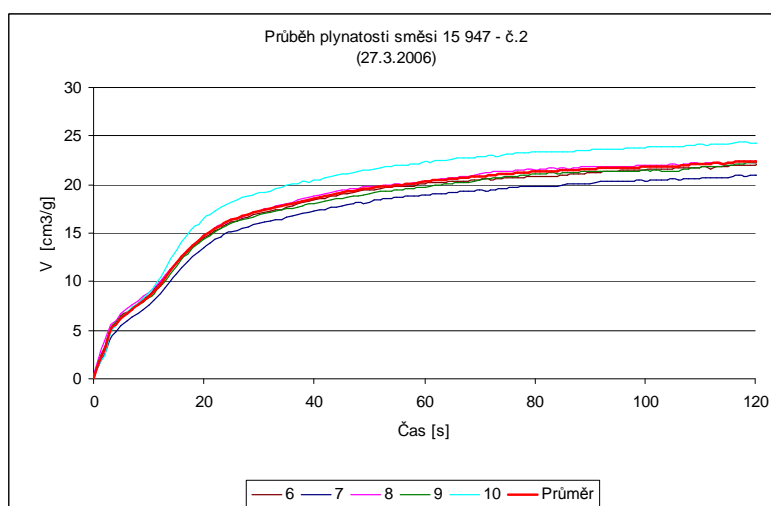
Typ	Stř. zrno d50 [mm] ± 0,03	Ztráta žíháním [%]	Pevnost v ohybu za studena [MPa] ± 0,5	Pevnost v ohybu za tepla [MPa] ± 0,5
15 947	0,26	4,2	11,5	5,0

Tabulka P 2 Složení grafitového nátěru dle firmy ČŽS s.r.o.

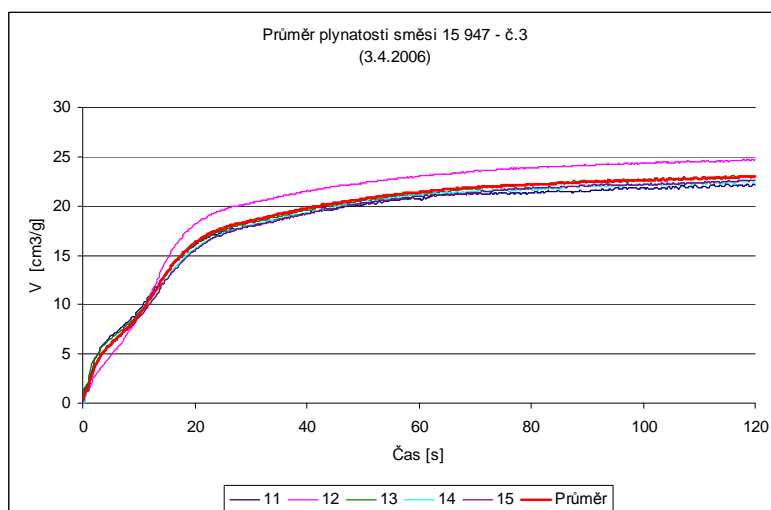
Grafitový nátěr (grafito-sazo-lihový nátěr na jádra)	
Složení dle interních předpisů firmy ČŽS s.r.o. [kg/t]	
Saze aktivní DG	15,9
Líh denaturovaný	621,1
Mastek technický II.	74,5
Bentonit Standard neaktivní	21,3
Tuha slévárenská SM I	236,4
Kysličník železitý technický	22,7
Fernal (pryskyřice)	8,1
$\rho = 1080-1120 \text{ kg/m}^3$	



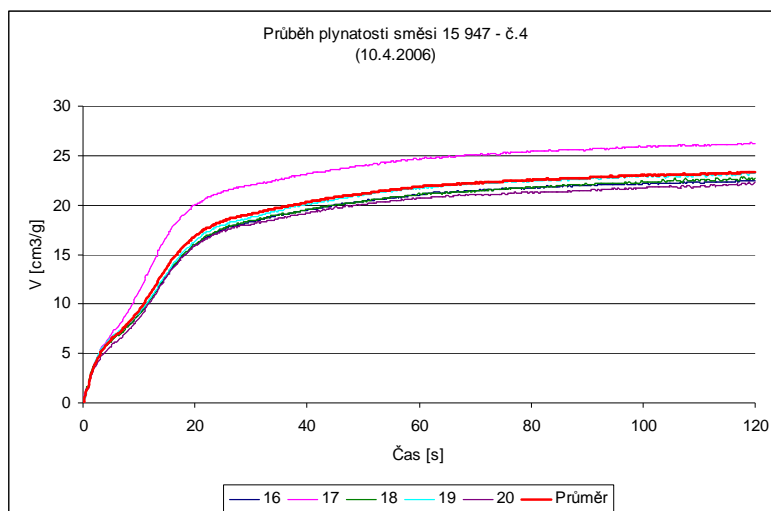
Obr. P 1 Časový průběh měření plynatosti směsi 15 947 – měření č. 1



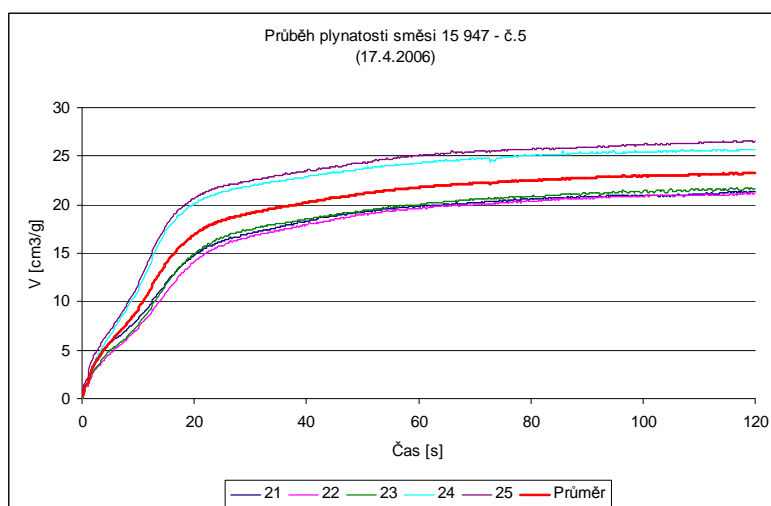
Obr. P 2 Časový průběh měření plynatosti směsi 15 947 – měření č. 2



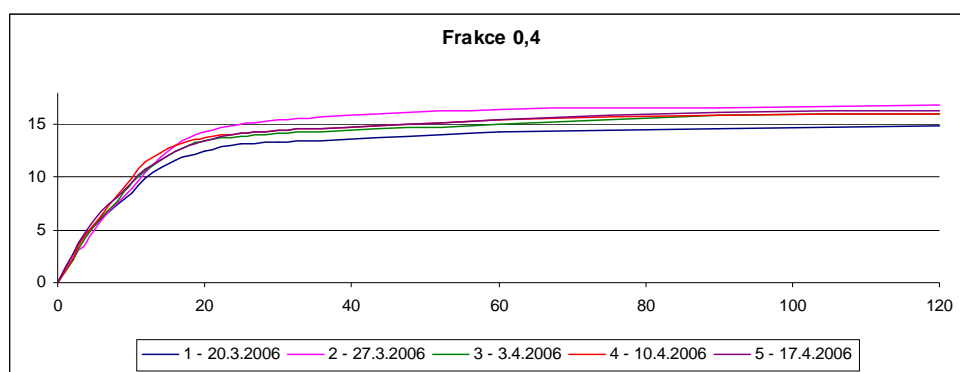
Obr. P 3 Časový průběh měření plynatosti směsi 15 947 – měření č. 3



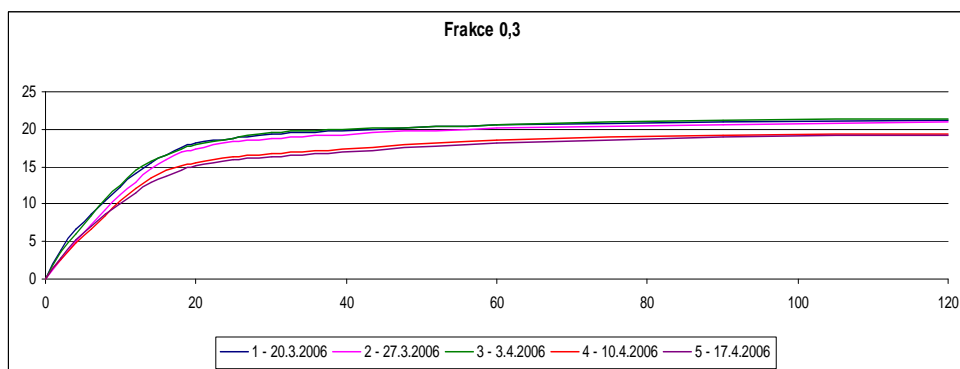
Obr. P 4 Časový průběh měření plynatosti směsi 15 947 – měření č. 4



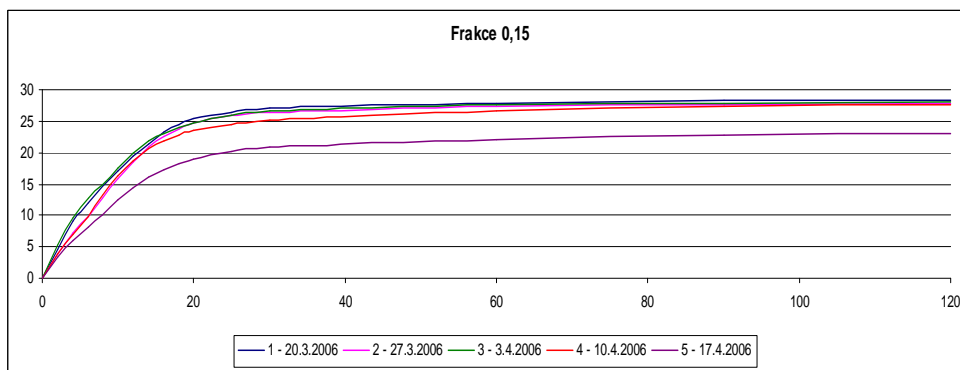
Obr. P 5 Časový průběh měření plynatosti směsi 15 947 – měření č. 5



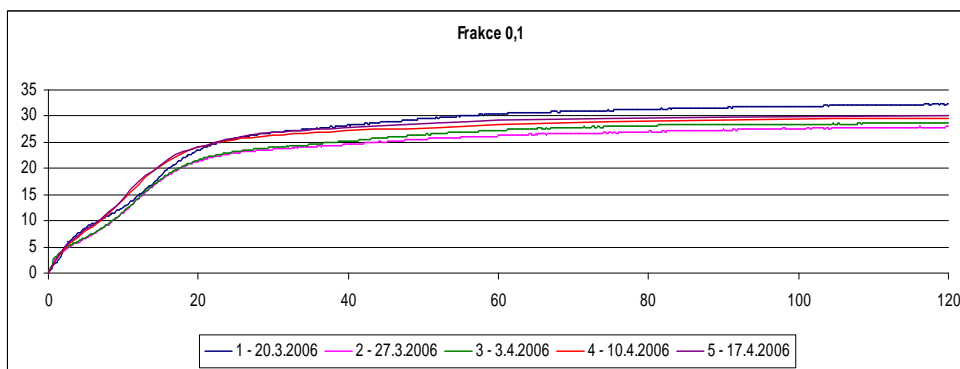
Obr. P 6 Časový průběh plynatosti frakce 0,4



Obr. P 7 Časový průběh plynatosti frakce 0,3



Obr. P 8 Časový průběh plynatosti frakce 0,15



Obr. P 9 Časový průběh plynatosti frakce 0,1


Příloha č. 5

Tabulka P 3 Výsledky měření plynatosti zkušebních jadérek – s nátěrem [cm³/g]

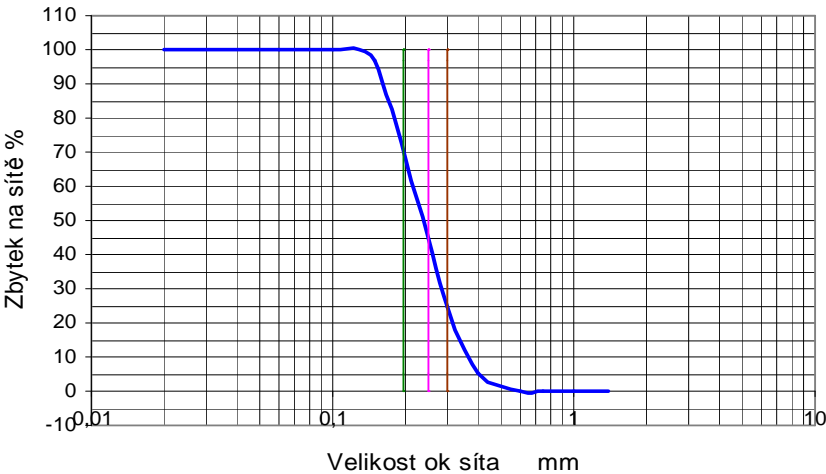
	Plynatost jádérka s nátěrem									
Čas [s]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
800 °C	0,24701	0,45275	0,60251	0,6835	0,74496	0,80111	0,86406	0,92486	0,99411	1,06518
1000 °C	0,91193	1,51043	1,85782	2,05743	2,28024	2,51513	2,82589	3,19861	3,58625	3,96924
1200 °C	1,3287	1,92241	2,54774	3,5498	5,11305	6,70085	8,3922	10,1344	12,0442	13,8707
Čas [s]	12	14	16	18	20	25	30	60	90	120
800 °C	1,09863	1,19787	1,29276	1,44103	1,5368	1,66484	1,77814	4,29594	5,78419	6,62092
1000 °C	4,74101	5,66653	6,79614	7,98453	9,07803	11,2918	12,6558	14,5976	15,2389	15,7042
1200 °C	17,0345	19,2121	20,6092	21,5524	22,1239	22,7958	23,1559	23,8078	23,8303	24,0147

Tabulka P 4 Výsledky měření plynatosti zkušebních jadérek – bez nátěru [cm³/g]

	Plynatost jádérka bez nátěru									
Čas [s]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
800 °C	0,49677	0,89088	1,09548	1,20645	1,2376	1,36531	1,44598	1,53047	1,63003	1,69896
1000 °C	0,51552	1,19652	1,91613	2,5158	2,95065	3,35831	3,7983	4,26032	4,68356	5,18316
1200 °C	0,95267	1,87222	2,68788	4,07475	5,81664	7,68126	9,53013	11,3957	13,4305	15,5296
Čas [s]	12	14	16	18	20	25	30	60	90	120
800 °C	1,7937	1,87552	2,01185	2,1409	2,24561	2,48861	2,62511	4,88463	6,3752	7,11036
1000 °C	6,25877	5,66653	8,89483	10,3034	11,6068	13,7833	15,0019	17,4484	18,477	18,7596
1200 °C	18,969	21,1278	22,5755	23,4198	23,8432	24,1916	24,3354	24,7619	25,0109	25,1174

 KERAMOST, a.s.		Granulometrický rozbor formovací směsi																													
Vzorek c.:	č.1 - 15 947																														
Označení:		Poznámka:																													
Datum odběru:	2.3 2006																														
Datum zkoušky:	2.3 2006																														
Navážka směsi g:	50																														
Ostřivo po výplavu g:	50																														
Vyplavitelné látky %:	0																														
Síta mm	zbytek g	zbytek %	součet %																												
1,400	0,00	0,0	0,0																												
1,000	0,10	0,2	0,2																												
0,750	0,00	0,0	0,2																												
0,600	0,00	0,0	0,2																												
0,400	2,60	5,2	5,4																												
0,300	9,70	19,6	25,0																												
0,150	35,70	72,0	97,0																												
0,100	1,50	3,0	100,0																												
0,060	0,00	0,0	100,0																												
0,020	0,00	0,0	100,0																												
0,000	0,00	0,0	100,0																												
0,000	0,00	0,0	100,0																												
0,000	0,00	0,0	100,0																												
0,000	0,00	0,0	100,0																												
0,010	0,00	0,0	100,0																												
celkem	49,6	100																													
<table border="1"> <tr> <td>r_s Sypaná obj. hmotnost ostřiva g/cm³</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>S_{th} Teoretický povrch cm²/g</td> <td>92,80</td> </tr> <tr> <td>MK_{calc} Střední velikost zrn mm</td> <td>0,252</td> </tr> <tr> <td>AFS</td> <td>52,9</td> </tr> <tr> <td>d_{50} mm:</td> <td>0,248</td> </tr> <tr> <td>d_{75} mm:</td> <td>0,196</td> </tr> <tr> <td>d_{25} mm:</td> <td>0,300</td> </tr> <tr> <td>Pravidelnost zrnitosti ostřiva d_{75}/d_{25} %</td> <td>65,3</td> </tr> <tr> <td>log w</td> <td>36,0</td> </tr> <tr> <td>log w %</td> <td>36,0</td> </tr> <tr> <td>Podíly ostřiva pod 0,125 mm %</td> <td>3,02</td> </tr> <tr> <td>n_{th} Teoretický spec. počet zrn ks/g</td> <td>69917,2</td> </tr> <tr> <td>S_w Specifický měrný povrch cm²/g</td> <td></td> </tr> <tr> <td>K_h Koeficient hranatosti S_w/S_{th}</td> <td></td> </tr> </table>				r_s Sypaná obj. hmotnost ostřiva g/cm ³	0	S_{th} Teoretický povrch cm ² /g	92,80	MK_{calc} Střední velikost zrn mm	0,252	AFS	52,9	d_{50} mm:	0,248	d_{75} mm:	0,196	d_{25} mm:	0,300	Pravidelnost zrnitosti ostřiva d_{75}/d_{25} %	65,3	log w	36,0	log w %	36,0	Podíly ostřiva pod 0,125 mm %	3,02	n_{th} Teoretický spec. počet zrn ks/g	69917,2	S_w Specifický měrný povrch cm ² /g		K_h Koeficient hranatosti S_w/S_{th}	
r_s Sypaná obj. hmotnost ostřiva g/cm ³	0																														
S_{th} Teoretický povrch cm ² /g	92,80																														
MK_{calc} Střední velikost zrn mm	0,252																														
AFS	52,9																														
d_{50} mm:	0,248																														
d_{75} mm:	0,196																														
d_{25} mm:	0,300																														
Pravidelnost zrnitosti ostřiva d_{75}/d_{25} %	65,3																														
log w	36,0																														
log w %	36,0																														
Podíly ostřiva pod 0,125 mm %	3,02																														
n_{th} Teoretický spec. počet zrn ks/g	69917,2																														
S_w Specifický měrný povrch cm ² /g																															
K_h Koeficient hranatosti S_w/S_{th}																															
Zpracoval: Jenčovský																															
Datum:																															

Sítový rozbor ostřiva



Velikost ok síta mm

Zbytek na síti %

— součet
— d50
— d25
— d75

Zpracováno programem Keramost, a.s.